

文章编号: 1007-2993(2024)05-0566-06

渭河一级阶地密实中砂层承载力及变形特性研究

王富辉 徐张建 王永刚 孙伟 赵治海 燕建龙

(西北综合勘察设计院, 陕西西安 710003)

【摘要】 依托西安市渭河一级阶地某工程项目, 通过现场试验及数值模拟对渭河一级阶地密实砂层地基进行承载力及变形特性研究, 确定类似场地是否可采用天然地基建设近百米高层建筑。研究表明: 渭河一级阶地密实中砂层的载荷试验 $P-s$ 曲线呈缓变型, 地基承载力特征值可取 600 kPa, 变形模量可取 40 MPa; 对渭河一级阶地类似工程进行分层总和法地基沉降计算时经验系数 ψ_s 可取 0.2; 当地质条件类似时, 建设近百米高层建筑采用天然地基是可行的。此研究结果可为西安渭河一级阶地高层建筑采用天然地基方案提供参考, 亦可为类似场地进行变形计算提供经验参数。

【关键词】 渭河一级阶地; 密实中砂; 天然地基; 地基承载力; 变形模量

【中图分类号】 TU471

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.010

Bearing Capacity and Deformation Characteristics of Dense Medium Sand Layer of Weihe First-order Terrace

Wang Fuhui Xu Zhangjian Wang Yonggang Sun Wei Zhao Zhihai Yan Jianlong

(Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710003, Shaanxi, China)

【Abstract】 Based on a project in the Weihe first-order terrace in Xi'an, the bearing capacity and deformation characteristics of the dense sand layer foundation were studied through field tests and numerical simulations to determine whether natural foundations for high-rise buildings of nearly 100 meters can be built in similar sites. The results show that: the $P-s$ curve of the load test of the dense sand layer in the Weihe first-order terrace is gently variable, the characteristic value of the bearing capacity of the foundation can be 600 kPa, and the deformation modulus can be 40 MPa. The empirical coefficient ψ_s can be taken as 0.2 for the calculation of foundation settlement by the sum-of-layers method for similar projects in the Weihe first-order terrace. When the geological conditions are similar, it is feasible to use natural foundations for the construction of high-rise buildings of nearly 100 meters. The results can provide a reference for the adoption of natural foundations for high-rise buildings on the Weihe first-order terrace, and also provide empirical parameters for deformation calculations on similar sites.

【Key words】 Weihe first terrace; dense medium sand; natural foundation; bearing capacity of foundation soil; deformation modulus

0 引言

近年来, 西北地区高层建筑不断涌现, 接近 100 m 的高层建筑愈来愈多, 此类建筑采用天然地基是否可行成为地区建设中的一个热点问题^[1-3]。

相较于建筑桩基或其他复合地基, 天然地基具有造价低、施工速度快、施工难度小等优点。而在岩土工程中, 砂层天然承载力高, 力学性能稳定, 分布较广, 经常作为建筑地基持力层出现在工程中。

秦月等^[4]研究发现宽级配砂相较于单一粒组砂维持高应力基础的能力更强。李震等^[5]、黄茂松等^[6]认为在荷载作用下, 松砂易发生冲剪破坏, 密砂

更容易发生整体剪切破坏。武孝天和徐永福^[7]发现基于 CSUH 模型推导计算得到的解可以较好地模拟砂土的剪胀、峰值强度的衰化过程。郭怀仁^[8]通过试验及数值模拟分析得出砂卵石土地基一般具有减振的作用。谭方等^[9]以成都熊猫城二期为例, 探讨了砂卵石土地基承载力与变形模量。蔡正银和李相菘^[10]通过三轴试验研究了砂土的变形特性与临界状态。

影响砂层地基承载力的因素主要为其自身特性, 如密实度^[11-12]、含水率等, 其次还有温度^[13]、生物条件^[14]、化学环境^[15]等。对于砂基承载力检测方法, 目

作者简介: 王富辉, 男, 1977 年生, 汉族, 河南泌阳人, 硕士, 正高级工程师。研究方向: 工程勘察、基坑与边坡、地质灾害、地基处理的理论与实践。E-mail: 564895882@qq.com

前常见的主要有原位载荷试验、标准贯入试验和旁压试验等。

上述研究中仍缺乏将密实中砂层作为高层建筑天然地基持力层的可行性研究。针对这一问题,本文基于西安渭河一级阶地沉积密实中粗砂地层,通过浅层平板载荷及标准贯入等现场试验分析和数值模拟进行承载力特性分析,得出建筑物基础底面以下中粗砂层的承载力特征值,并分析其密实度、均匀性,通过强度和变形两方面评价,研究分析高层或超高层建筑采用天然地基方案的可行性,为西安渭河一级阶地高层建筑首次采用密实中砂地层作为天然地基方案提供准确的科学依据。研究成果可为西安渭河一级阶地高层建筑采用天然地基方案提供参考,并提供经验参数。

1 渭河一级阶地工程地质条件

据《西安城市工程地质图集》^[16],西安市位于渭河断陷盆地中段南部,西安凹陷的东南隅。渭河由西向东自西安市北侧流过,在北郊及西北郊冲积而成广阔的河谷冲积平原区,在地貌单元上划分为渭河漫滩、一、二、三级阶地。位于西安市北郊的西安经济技术开发区及西北郊的西咸新区沣东新城、沣西新城,大部分地段属渭河一级阶地,地面约 10.0 m 深度以下主要为大厚度密实中粗砂层,局部相变为粉细砂层。场地地下水属第四纪孔隙潜水,地下水稳定水位埋深为 10.00~29.60 m。

以沣东新城某项目为工程背景,项目包括 4 栋地上 26 层、29 层(高度分别为 99.85 m 和 99.40 m)的塔楼及地下车库,地下 3 层,基底压力分别为 560 kPa 和 620 kPa,基础埋深-17.8 m。

该项目位于三桥板块核心区域,所处地貌单元为渭河一级阶地,地下水埋藏较深,稳定水位埋深为 28.70~29.60 m。项目所处地段属大厚度砂层分布区域,自地面以下深度 11.0 m 范围内地层主为黄土状土,其下 75.0 m 深度范围内主要为密实中粗砂层,其内夹粉细砂、粉土、粉质黏土薄夹层或透镜体,见表 1 和图 1。

场地内分布的中粗砂层天然承载力较高,压缩性极低,可充分发挥密实中粗砂层的良好工程特性。

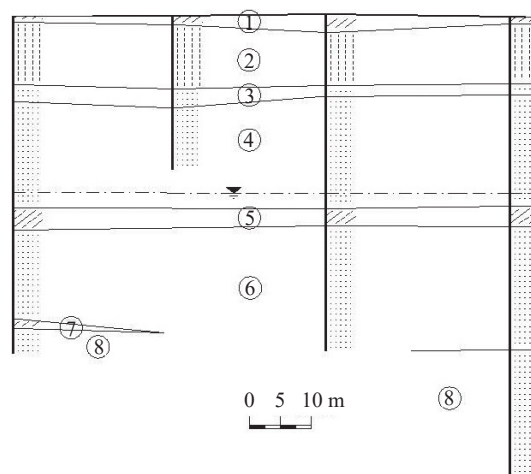
2 中砂层天然地基承载力

对渭河一级阶地浅层分布的第四系晚更新统冲积砂类土,岩土工程勘察报告中提供的承载力特征值一般不超过 300 kPa,进行深宽修正后地基土承载力特征值仍无法满足本项目上部荷载要求,必须采取地基处理措施,使得建筑成本相应增加。本文利用《岩

土工程勘察规范》^[17]要求的试验方法对该工程中天然地基进行承载力测试。

表 1 西安渭河一级阶地地层概况

地层年代	岩土特性	分布厚度/m
黄土状土 Q_4	褐黄—黄褐色,土质欠均匀,下部夹粉质黏土透镜体,坚硬—硬塑,属中—高压缩性土,具轻微湿陷性,局部具自重湿陷性	10.0~20.0
中粗砂 Q_4	黄褐色,成分以石英、长石为主,层内局部夹粉质黏土或粉细砂透镜体,密实,干燥—饱和	15.0~30.0
中粗砂 Q_3	灰黄—浅灰色,成分以石英、长石为主,层内夹多层粉质黏土透镜体,密实,饱和	>50.0



①填土 ②黄土状土 ③粉细砂 ④中砂 ⑤粉质黏土
⑥粉细砂 ⑦粉质黏土 ⑧中砂

图 1 沣东新城某项目地质剖面

2.1 浅层平板载荷试验

为详细查明中粗砂层地基承载力特征值及密实度、均匀性,在建筑基坑开挖后,于场地不同位置对中粗砂层进行浅层平板载荷试验,每栋塔楼下布置 3 处浅层平板载荷试验点,共计 12 处。现场浅层平板载荷试验见图 2。

根据本项目的浅层平板载荷试验结果,12 处载荷试验均呈现一定的规律性: $P-s$ 曲线均为缓变型,无明显的比例界限点; $t-s$ 关系曲线所显示的沉降稳定趋势良好;各级荷载下 $s-lgt$ 曲线尾部均无明显向下弯曲。

2.2 标准贯入试验

考虑到缺少类似工程经验,在主要依靠浅层平板载荷试验的前提下,对场地内中粗砂层进行标准贯入原位测试,进一步研究该地层密实度和均匀性,并综合评价天然地基承载特性。鉴于建筑物基础埋深为-17.8 m,选取勘察阶段自然地面以下 17.0~20.0

m 深度该地层标准贯入试验数据进行了统计分析(见表2)。



图2 浅层平板载荷试验

表2 标准贯入试验成果统计表

层序	地层名称	实测锤击数 N					
		统计个数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
④	中粗砂	17	40	61	52.0	5.6	0.11

2.3 试验结果分析

图3为本项目的浅层平板载荷试验曲线,依据《地基基础检测规范》^[18],取 $s/b=0.01$ (此处 b 为承压板直径1.0 m)所对应的荷载判定为地基承载力特征值,且其值不应大于最大加载量的一半。表3为载荷试验结果。由表3和图3可知12组载荷试验得出的地基承载力特征值在617~750 kPa,1#—4#楼的地基承载力判定结果分别为750,749,741,646 kPa。

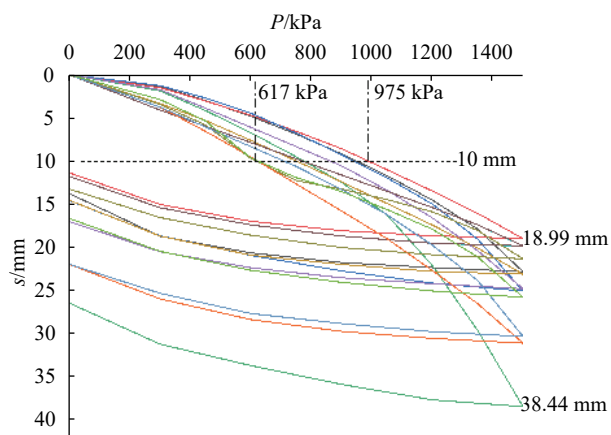


图3 密实中砂承载力与沉降关系曲线

拟建场地的4栋楼均设计3层地下室,基础埋深大,其承载力深度修正值较大。综合考虑以上因素,并结合工程及地区经验,地基持力层中粗砂层的地基承载力特征值按600 kPa取用。

表3 载荷试验结果表

试验编号	最大荷载1500 kPa对应的变形值/mm	承载力特征值/kPa
1	22.82	750
2	18.99	750
3	25.05	750
4	24.80	750
5	23.10	750
6	19.86	750
7	19.82	750
9	38.44	617
10	31.09	623
11	25.78	708
12	30.32	625

通过钻探和井探采取原状土样进行室内试验,依据地基土物理力学性质指标、载荷试验或其他原位测试、公式计算,并结合工程经验综合确定地基土承载力(见表4)。

表4 几种方法确定地基承载力

地层名称	标准贯入试验 规范查表法 f_k /kPa	标准贯入试验 经验公式法 f_k /kPa	一般勘察 报告 f_{sk} /kPa	浅层载荷 试验 f_{sk} /kPa
中粗砂	478	459, 625	220~300	617~750

注:根据标准贯入试验规范查表法系参考《地基基础设计规范》(GBJ 7—89)查附录5-8^[19]。

以表2中的标准贯入击数平均值为依据,标准贯入试验经验公式法系参考《工程地质手册》(第五版)^[20]标准贯入击数 N 与 f_k 的经验关系式:铁道部第三勘察设计院 $f_k=-803+850N^{0.1}=459$ kPa,纺织工业部设计院 $f_k=105+10N=625$ kPa。

综合评价地基土承载力结果如下:按规范查表法、标准贯入试验法和一般勘察报告提供的承载力明显偏小,浅层平板载荷试验确定的承载力较大。综合分析认为,天然地基的承载力可以满足24层和29层建筑物上部荷载(560 kPa和620 kPa)的要求。

3 地基土变形模量

根据《岩土工程勘察规范》中的式10.2.5-1^[17]: $E_0=I_0(1-\mu^2)pd/s$,式中 I_0 取0.785, μ 取0.30, p 取各试验点的特征值, d 取1.0 m, s 为各试验点在特征值荷载作用下所对应的沉降量。

以各试验点序号(1—12)为横轴,对应承载力特征值为竖轴,绘制地基承载力特征值如图4所示。

地基土的变形模量建议值系基于如下考虑:

①由各栋楼的变形模量计算值结果看,最大值、最小值相差较大,其主要原因是按相对变形控制判定

的各点承载力特征值差别较大;

②按照 P 取 600 kPa, s 取 10 mm 考虑, 得到的变形模量 E_0 约为 43 MPa。

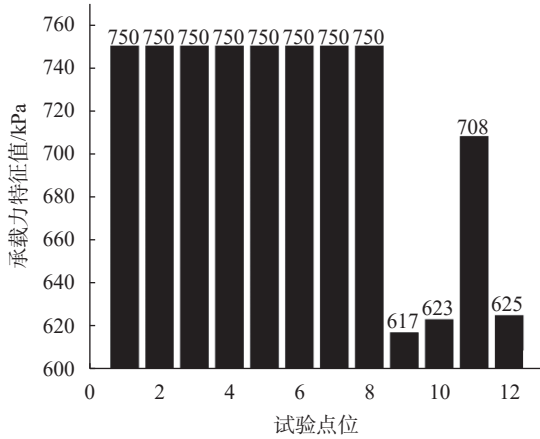


图4 地基承载力特征值

以表2中的标准贯入击数平均值为依据, 参考《工程地质手册》(第五版)^[20]E Schultze 和 H Menzenhach 实测标准贯入击数 N 与 E_s 的经验关系式 3-3-13^[20]:

$$\text{当 } N > 15, E_s = 4.0 + C(N - 6) \quad (1)$$

取 $C=0.60$, 则 $E_s=31.6$ MPa。

参考《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》一般第四纪沉积土根据实测标准贯入击数 N 和深度 z 与 E_s 的经验关系式 7.4.10^[21]:

$$E_s = 0.712z + 0.25N + \eta_s \quad (2)$$

取 $z=17.8$ m, $\eta_s=18.1$, 则 $E_s=43.8$ MPa。

根据上述结果, 并结合西安地区工程及经验, ④中粗砂层的变形模量较接近于《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》一般第四纪沉积砂类土根据实测标准贯入击数 N 和深度 z 与 E_s 的经验关系式计算结果, 严格按照有关规范要求对基坑浅部受扰动表层进行压实处理后, ④中粗砂层的变形模量 E_0 按 40 MPa 取用。

4 沉降模拟分析

为精确分析天然地基沉降, 采用莫尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 模型, 利用 ABAQUS 有限元软件对天然地基沉降量进行模拟计算分析。为提高计算精确度, 将模型的计算深度定位于基底以下 70.0 m, 处于⑧中砂层中。模型水平向尺寸按《建筑变形测量规范》(JGJ 8—2007) 规定, 沉降观测点应布置在距离建筑物 1.5~2.0 倍的基础埋深范围内。拟建 3#楼模型的长、宽取为基础宽度 (28.2 m) 的 4.7 倍, 模型高

度取基础宽度的 2.7 倍 (76 m), 即模型长 132 m、宽 132 m。模型计算的各土层参数见表 5。

表5 模型计算各土层参数

地层名称	地层厚度/m	重度 $\gamma(\gamma')$ /(kN·m ⁻³)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	$E_s(E_0)$ /MPa
④中粗砂	11.7	20	0	36	(40)
④中粗砂	2.2	20(10)	0	36	(40)
⑤粉质黏土	2.9	19.3	30	22	18.53
⑥中粗砂	19.8	20(10)	0	36	(40)
⑧中砂	33.4	20(10)	0	36	(40)

Mohr-Coulomb 模型屈服面函数:

$$F = R_{mc}q - p \tan \varphi - c = 0 \quad (3)$$

其中:

$$R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \tan \varphi \quad (4)$$

图5—图8为数值模拟计算结果。从图5—图8中可以看出, 3#楼(29F)随荷载的逐渐增大, 地基下的沉降随之增大, 经过中部粉质黏土层后, 沉降量逐渐减小; 筏板基础中心点下地基沉降值最大, 为 87.47 mm; 沉降曲线整体较为平缓, 表明整个筏板基础下地基沉降是比较均匀的; 基础角点和基础中心的沉降差最大约为 15 mm; 地基平均沉降量约为 84 m。

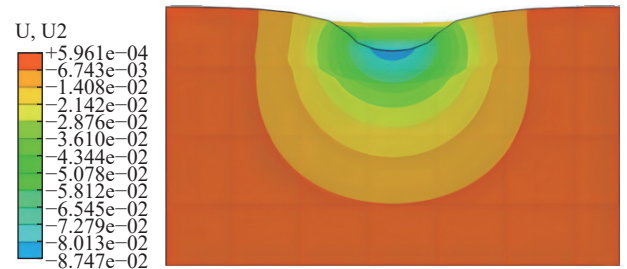


图5 地基竖向剖面沉降云图

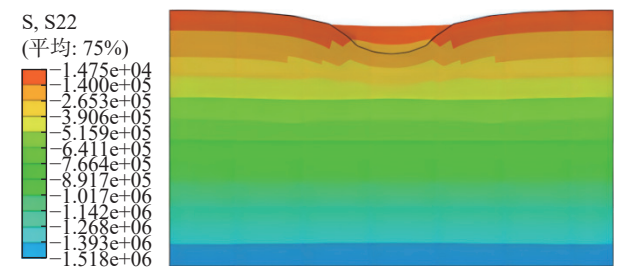


图6 地基竖向应力云图

地基沉降在砂类土层中基本呈线性分布; 在基底以下 13.9~16.8 m 范围内粉质黏土层沉降斜率增大, 表现为明显降落段, 产生的压缩变形最大; 0~13.9 m 由于中粗砂较为密实, 虽然应力大但并没有产生较大

变形; 0~13.9 m 的沉降量为 22 mm, 占总沉降量的 25%; 13.9~16.8 m 的沉降量为 21 mm, 占总沉降量的 24%; 16.8~65 m 的沉降量约为 43 mm, 占总沉降量的 49%; 65 m 深度以下土层的压缩量约为 2 mm, 约占总沉降量的 2.3%, 即压缩层厚度约为 65 m。

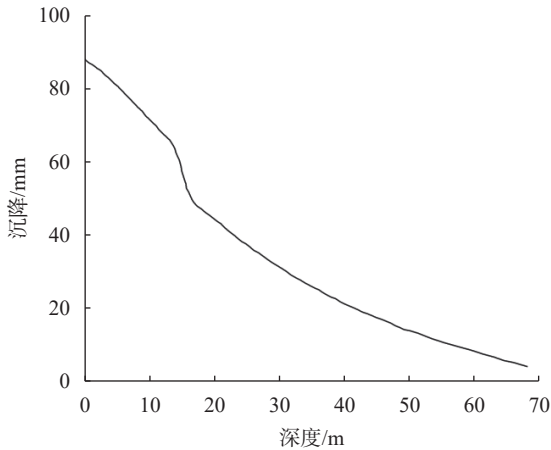


图7 基础中心点下不同深度的土体沉降分布图

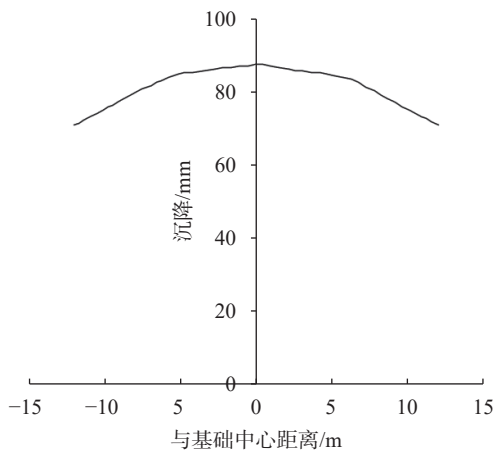


图8 沿筏板基础宽度方向地基沉降分布图

5 沉降观测

在综合确定的压缩层内中粗砂、粉质黏土的变形(压缩)模量基础上,按《建筑地基基础设计规范》采用分层总和法^[22]估算的3#楼基础中心点沉降量约为 30.45 mm(ψ_s 取 0.2),按《高层建筑岩土工程勘察规程》估算的基础中心点平均沉降量约为 40.56 mm(ψ_s 取 0.2)。

为检验该项目高层建筑采用天然地基方案的实际效果,在高层主体施工期间对 26 层、29 层塔楼进行沉降监测。以 3#楼为例,沉降观测点布置图见图 9,对沉降观测结果绘制沉降观测曲线见图 10。

如图 10 所示,3#楼角点的最大沉降量为 24.50 mm,比较接近前述估算沉降数值,各角点间的最大差异沉降量 4.44 mm。主体施工期间(0~7 个月)为

上部荷载主要施加期,沉降随上部荷载的施加增加较快,沉降速率 0.063 mm/d,主体封顶后 7~18 个月为沉降持续发展期,沉降随内外装修荷载的施加持续增加,沉降速率 0.041 mm/d,主体封顶后 19~30 个月为沉降趋于稳定收敛期,沉降速率 0.002 mm/d。

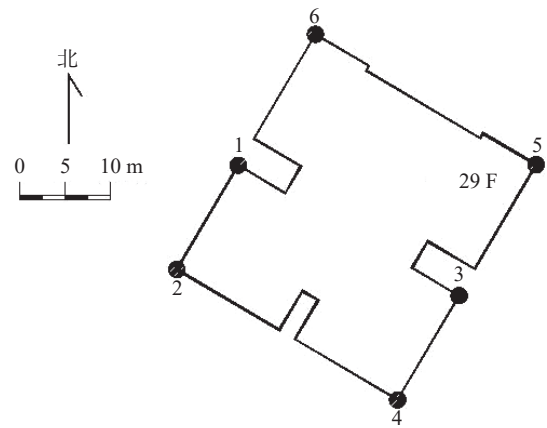


图9 沉降观测点布置图

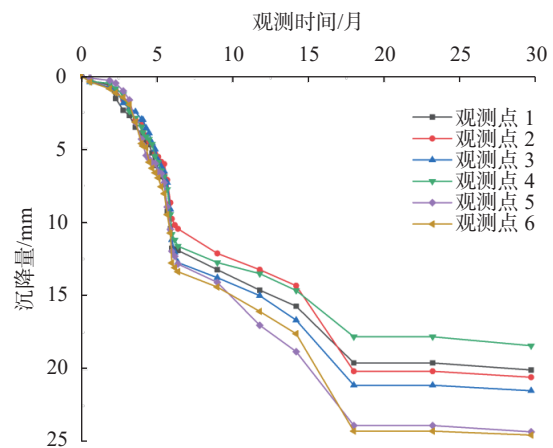


图10 沉降观测曲线

根据 1#—4#楼各角点的沉降观测结果,主体封顶后的总沉降量介于 13.01~24.50 mm,沉降观测数据和前述估算沉降数据较为接近,且沉降均匀。建筑物总沉降量和差异沉降量不但满足现行规范要求,而且和同类场地类似工程项目采用钻孔灌注桩基础的建筑物沉降量基本相当。

对采用 ABAQUS 有限元软件计算的沉降量、规范方法计算的沉降量与沉降观测沉降量三者进行对比分析,采用 ABAQUS 有限元软件计算的沉降量比实测值大的多,主要原因是计算采用的地基土压缩模量是按文中综合考虑各种因素后的取值,比实际的压缩模量值小,因此计算的沉降量大,而根据规范方法计算的沉降值与沉降观测值基本吻合,也验证了利用分层总和法进行沉降计算时经验性。

6 结论

本文以渭河一级阶地某工程为背景,对该工程密实中砂层承载特性进行研究。以现场试验、数值模拟和现场监测验证相结合的方式,发现该地区密实中砂层可作为高层建筑天然地基,结论如下:

(1)西安渭河一级阶地密实中砂层分布均匀,承载性能良好。现场平板载荷试验和标准贯入试验表明,该区域密实中砂层可满足上部高层建筑 600 kPa 荷载的承载力要求。

(2)该地区密实中粗砂层内夹粉细砂、粉土、粉质黏土薄夹层或透镜体,地基压缩性小,在上部荷载作用下变形较小,能满足高应力作用下建筑地基变形要求。

(3)利用现场试验参数进行沉降变形预测,并经现场沉降监测验证,在该区类似地层类似工程中利用分层总和法进行沉降计算时经验系数 ψ_s 可取 0.2。

参 考 文 献

- [1] 张俊飞. 高层建筑采用砂卵石层天然地基的可行性分析 [D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [2] 金云平, 顾晓鲁. 高层建筑天然地基基础形式的运用 [J]. 岩土力学, 2001(2): 189-191.
- [3] 苗长春, 张平顺, 任讯波. 西安地区以细中砂为持力层采用天然地基的某 33 层高层建筑设计 [J]. 建筑结构, 2017, 47(2): 96-99.
- [4] 秦月, 孟庆山, 汪稔, 等. 钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1714-1720, 1736.
- [5] 李震, 赵洪波, 刘尚各, 等. 考虑围压效应和塑性演化机制的中密砂力学模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2610-2620.
- [6] 黄茂松, 姚仰平, 尹振宇, 等. 土的基本特性及本构关系与强度理论 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(7): 9-35.
- [7] 武孝天, 徐永福. 基于 CSUH 模型的砂/黏土不排水柱孔扩张统一解 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1019-1028.
- [8] 郭怀仁. 砂卵石土地基-筏板-巨型框架结构动力相互作用研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(1): 168-171, 188.
- [9] 谭方, 吴帅, 黄宗芳, 等. 成都地区超高层建筑砂卵石土地基承载力取值探讨 [J]. 建筑结构, 2013, 43(11): 30-32, 83.
- [10] 蔡正银, 李相崧. 砂土的变形特性与临界状态 [J]. 岩土工程学报, 2004, 15(5): 697-701.
- [11] 徐日庆, 王兴陈, 朱剑锋, 等. 初始相对密实度对砂土强度特性影响的试验 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 345-349.
- [12] 朱俊高, 史江伟, 罗学浩, 等. 密度对砂土应力应变强度特性影响试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 336-341.
- [13] 陈志涛. 高速铁路路基注浆整治冻害试验研究 [J]. 中国铁路, 2022(1): 38-44.
- [14] 王逸杰, 蒋宁俊. 原位激发微生物成矿加固钙质砂的剪切与压缩特性研究 [J]. 高校地质学报, 2021, 27(6): 662-669.
- [15] 刘家明. 盐溶液环境下微生物固化砂的物理力学特性及微观结构试验研究 [D]. 广州: 广州大学, 2021.
- [16] 西安市城市管理局, 西安市勘察测绘院. 西安城市工程地质图集 [M]. 西安: 西安地图出版社, 1998.
- [17] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [18] JGJ 340—2015 地基基础检测规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [19] GBJ 7—89 建筑地基基础设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [20] 化建新, 郑建国. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [21] DBJ 11501—2009 北京地区建筑地基基础勘察设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [22] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

收稿日期: 2023-08-21