

西北湿陷性黄土区劈裂注浆试验及地基加固应用

罗小博[†], 宋戡, 郭启明
(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:为验证劈裂注浆加固法在处理西北湿陷性黄土地基的有效性与实用性,并指导安全施工,首先在加固建筑物所在场地进行劈裂注浆现场试验,56 d 后分别对天然地基与注浆后复合地基进行静载荷试验;在此基础上,进行 30 d 浸水试验,采集注浆微观图、承载力及湿陷量等原始数据.利用试验结果,并结合现场待加固建筑,用同种材料及试验方法等对其进行纠倾加固.结果表明:在一次注浆最大压力为 0.3 MPa、二次注浆最大压力为 0.6 MPa 的条件下,采用 1:1(质量比)水泥浆液的钢花管两次、分层劈裂注浆法表现出了良好的劈裂效果;劈裂注浆法加固处理后的黄土地基承载力较原有地基提高了近 3 倍,极大地改善了黄土的工程性质;注浆后能够有效消除黄土超过 67% 的湿陷性;建筑物发生均匀沉降,稳定性较好.同时,提出了一种适用于桩径较小的基于桩土应力比计算的复合地基沉降计算新方法.

关键词:劈裂注浆;地基加固;湿陷性黄土;现场试验;沉降计算
中图分类号:TU472.6 **文献标志码:**A

Split Grouting Test and Application of Foundation Reinforcement in Collapsible Loess Area in Northwest China

LUO Xiaobo[†], SONG Yu, GUO Qiming
(College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to verify the effectiveness and practicability of splitting grouting reinforcement method in treating collapsible loess foundation in northwest China, and to guide the safety construction, firstly, the split grouting field experiment was carried out on the site where the reinforced building is located. After 56 days, static load tests were carried out on the natural foundation and the grouting composite foundation. On this basis, a 30-day immersion test was carried out to collect the raw data such as grouting micrographs, bearing capacity and collapsibility. According to the test results, combined with the on-site building, the same materials and test methods were used to correct the tilting and reinforce the building. The results showed that: under the condition that the maximum pressure of primary grouting was 0.3 MPa and the maximum pressure of secondary grouting was 0.6 MPa, the method of split grouting with steel tube with mass ratio 1:1 cement slurry and split grouting in two layers showed a good splitting effect. The bearing capacity of the loess foundation strengthened by splitting grouting method was nearly three times higher than that of the original foundation, which greatly improved the engineering properties of the loess. After grouting, more than 67% loess collapsibility could be effectively eliminated. The building underwent uniform settlement and had good stability. In addition, a new settlement calculation method based on pile-soil stress ratio for composite foundation with small pile diameter was proposed.

Key words: splitting grouting; foundation reinforcement; collapsible loess; field test; settlement calculation

* 收稿日期:2020-09-11

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:罗小博(1992—),男,甘肃定西人,兰州理工大学博士研究生

[†] 通信联系人, E-mail: lutxb123@163.com

随着“一带一路”倡议的不断推进,从国家发展战略出发,西北地区赢得了广阔的发展空间,尤其在建筑工程领域取得了快速发展^[1].众所周知,西北地区地质条件主要以湿陷性黄土^[2]居多.该土有别于软土、黏土等,具有浸水后的原状黄土微观颗粒间发生物理、化学反应,原稳定结构遭到严重破坏,土体强度明显下降,在力的作用下产生湿陷性变形等显著特征,导致建筑结构产生不均匀沉降,影响安全与稳定^[3].

目前,在工程结构地基加固方面通常采用的传统方法有夯实法、灰土垫层法、挤密桩法,但它们分别具有对既有建筑扰动大、易受水侵蚀、施工冗杂及污染环境等缺点,因而在现代化生产中逐渐被弃用.相应地,新型劈裂注浆法由于具有施工速度快、影响范围小、经济效益高等优点,很快被纳入地基处理的理论与实践应用当中.周茗如等^[4]依据浆液性能试验及室内模型试验对水泥基浆料在黄土劈裂注浆中的应用进行研究;周书明等^[5]利用洞内超前预注浆方法对隧道拱部淤泥质黏土地层进行加固,效果良好;孙峰等^[6]采用劈裂注浆对已沉降变形的地下管道进行抬升处理,并结合三维有限差分数值法对其进行验证,结果与试验相吻合;为了提高钢管微型桩的水平抗剪及抗弯性能,王开洋等^[7]提出了一种二次注浆竖向钢管微型桩新技术;周茗如等^[8-9]从断裂力学角度出发,提出了一种黄土劈裂注浆土体裂纹扩展模型,在注浆压力及土体应力作用下,浆液在裂纹中形成浆脉,对土体起到骨架支撑作用. Li等^[10-14]众多学者对劈裂注浆理论、试验及应用方面也进行了大量的研究.

然而,对于湿陷性黄土地区劈裂注浆^[15]复合地基的相关研究仍处于起步阶段,未见对其稳定性、承载能力及沉降计算进行过确定的分析与评价.各种重要参数只能依靠施工经验来确定,具有很大的不确定性,甚至对一些施工精度较高的结构来说,其安全性更加无法保证.基于此,本文以甘肃省定西市某工程

场地为研究对象,对劈裂注浆加固后的复合地基进行静载荷试验及浸水试验,并对完工后的建筑物进行沉降监测,提出一种适用于桩径较小的复合地基的沉降计算新方法,并与传统计算方法进行对比分析,为今后类似场地同类型地基结构的设计、施工及加固等提供参考.

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

甘肃定西地处黄土高原和西秦岭山地交汇区,试验场地位于定西北部的黄土丘陵沟壑区,占地面积约 1 642.45 m²,湿陷性较强.此处建有一栋长 21.5 m、宽 15.8 m、高 13.7 m 的三层砖混结构建筑物,基础形式采用条形基础,埋深 1.5 m,设计使用年限为 50 年.

1.2 地质条件

根据相应工程地质勘查报告可知,建筑场地土层自上而下依次分为:素填土(Q₄^{ml})、粉质黏土(Q₄^{al+pl})、黄土状粉土(Q₄^{col})及泥岩(N),其基底下各土层示意图如图 1 所示,具体参数见表 1.

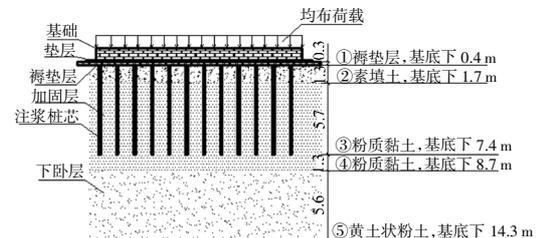


图 1 基底下土层分布图

Fig.1 Distribution of subbasement soil

2 劈裂注浆试验

由于加固工程时间紧迫,且考虑到后续一系列试验,在该工程场地范围内(土层分布基本一致)选取某一区域,采用与实际加固工程完全一样的材料、

表 1 基底下土层参数取值

Tab.1 Parameter value of soil layer under basement

土层	土类	厚度/m	孔隙比	塑限/%	液限/%	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	z _i /m	E _s /MPa
①	褥垫层	0.3	—	—	—	18.0	—	0.4	80.0
②	素填土	1.3	0.954	17.8	30.2	16.9	0.40	1.7	5.7
③	粉质黏土	5.7	0.942	18.1	30.9	18.3	0.35	7.4	9.3
④	粉质黏土	1.3	0.942	18.1	30.9	18.3	0.35	8.7	9.3
⑤	黄土状粉土	5.6	0.874	18.3	31.4	18.6	0.32	14.3	11.8

方法等,进行劈裂注浆基础性试验.

2.1 原材料及设备的选择

注浆主要材料选用 PO.42.5 普通硅酸盐水泥,物理力学性能指标见表 2,采用满足规范^[6]要求的自来水,并依照文献^[17],按 1:1 水胶(质量)比配制水泥浆备用.

表 2 水泥物理性能指标

Tab.2 Physical properties of cement

材料	凝结时间/min		标准稠度(水量法)/%	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	抗压强度/MPa		抗剪强度/MPa	
	初凝	终凝			3 d	28 d	3 d	28 d
水泥	137	186	25.4	337	25.7	53.8	6.1	7.9

试验中常用设备有:水泥搅拌机、履带式潜孔钻机、KS100/120 液压注浆机及耐振型压力表,主要仪器如图 2 所示.



(a)水泥搅拌机



(b)履带式潜孔钻机



(c)KS100/120 液压注浆机

图 2 主要仪器

Fig.2 Layout of instruments

2.2 孔位布置、注浆方式及过程

注浆钻孔直径取 160 mm,孔距 800 mm,深度 7.2 m,共计 23 孔,按正三角形布设(避免了单桩置换面积重叠效应的发生,在满足设计强度要求的前提下,节约成本,使得经济效益最大化),并对每孔进行编号,如图 3 所示.

然后采用底端密封、可拆卸的、用螺纹连接的五

等段钢花管自下而上的两次分层注浆法,即第一次采用全段开孔钢花管注浆(如图 4(a)所示),第二次注浆时所用钢花管仅在末端 1.4 m 处开孔(如图 4(b)所示).

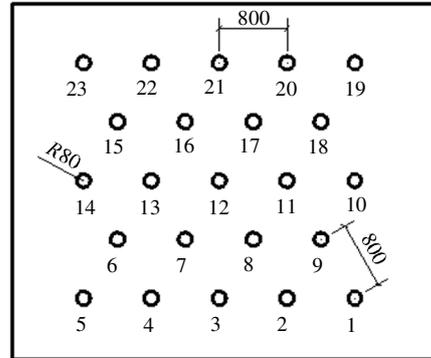
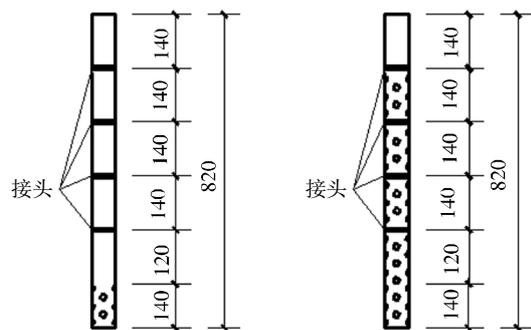


图 3 注浆孔布置(单位:mm)

Fig.3 Layout of grouting hole (unit:mm)



(a)一次注浆所用

(b)二次注浆所用

图 4 钢花管示意图(单位:cm)

Fig.4 Diagram of steel flower tube (unit:cm)

为了后续开挖方便且不影响附近注浆孔,选择图 3 中边缘处的孔 1 与孔 2 为研究对象.一次钻孔注浆时,在压力表上控制最大注浆压力为 0.3 MPa,待指针出现明显回落时,表明孔周土体已被劈裂,此时继续注入水泥浆液至设计量;1 d 后再进行二次钻孔注浆,分别对第 5 层、第 4 层、第 3 层、第 2 层、第 1 层注浆,每次保证最大注浆压力 0.6 MPa,指针有明显回落时停止注浆;最后对由于吸水下陷的每孔进行补浆,循环 4~5 次至补满为止,以保证桩身的完整性.

2.3 静载荷及浸水试验

2.3.1 天然地基与注浆复合地基静载荷试验

为了验证劈裂注浆后地基较天然地基承载效果,需对两者分别测出 Q-s 关系曲线,进而对比分析所得特征值大小.在场内地内随机选取 3 块区域作为天然地基,选取注浆 56 d 后桩身较完整的 1 号、5

号、8 号、18 号桩作为单桩复合地基. 主要仪器采用: 50 t 液压千斤顶、量程为 1 cm 及精度为 0.001 mm 的千分表、直径 800 mm 及厚度 30 mm 的圆形钢载荷板、一辆空载约 40 t 的双桥车, 如图 5 所示.



图 5 现场加载图

Fig.5 Diagram of field loading

利用 10 kg 重的触探仪锤依据规范^[18]选取 5 点进行轻型动力触探试验, 测出天然地基的最大加载量约为 140 kN; 劈裂注浆复合地基可参考文献^[19-20]估算出所需要的最大加载量为 400 kN. 试验前期准备就绪后, 分 9 级进行现场加卸载试验, 每级加载量见表 3.

表 3 分级加载表
Tab.3 Graded loading

地基类型	每级加载量/kN								
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级	7 级	8 级	9 级
天然地基	28	42	56	70	84	98	112	126	140
复合地基	80	120	160	200	240	280	320	360	400

2.3.2 浸水试验

为了进一步评价劈裂注浆对黄土湿陷性的消除效果, 在原静载试验的基础上, 分别在天然地基与注浆后的复合地基上开挖长、宽、高分别为 2.8 m、2.4 m 及 0.3 m 的试坑(两坑浸水互不影响), 其中复合地基

的开挖位置如图 6 所示, 试坑内包括 10 根完整的劈裂注浆桩, 且四周均处于浆脉作用范围之内, 以示充分代表劈裂注浆复合地基. 在每个试坑中分别设置 4 个沉降观测点, 复合地基考虑到浆脉填充挤密作用下桩周土的湿陷性, 因此, 沉降观测点的设置要尽量避开桩芯所在位置, 设置在桩间土之间, 如图 6 所示. 距试坑边 10 m 处设置 2 个基准点, 分别用于日常观测及校核.

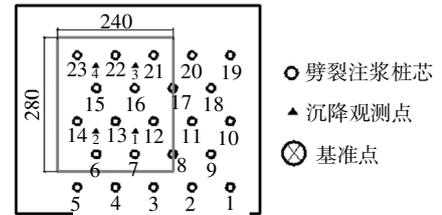


图 6 复合地基浸水位置及沉降观测点位置
Fig.6 Position and settlement observation point of the composite foundation

然后向试坑中注水, 水头控制在 15~20 cm, 此次浸水试验共注水 30 d, 总注水量约为 168 m³, 现场注水情况如图 7 所示.

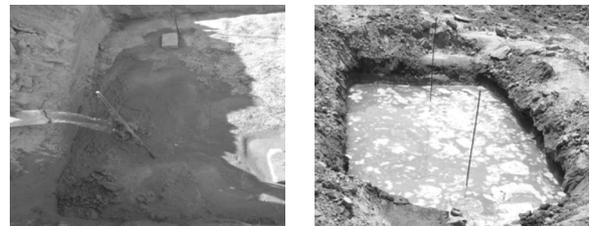


图 7 试坑现场注水图

Fig.7 Water injection at test pit

对浸水阶段(30 d)及停止注水阶段(30 d)的湿陷量进行统计, 记录如表 4 所示.

表 4 试坑湿陷量记录表

Tab.4 Recording the depression of test pit

时间/d	湿陷量/mm		时间/d	湿陷量/mm		时间/d	湿陷量/mm	
	天然地基	复合地基		天然地基	复合地基		天然地基	复合地基
1	0.0	0.0	11	53.9	17.1	30	105.4	32.8
2	1.5	0.5	13	63.6	20.2	35	108.5	33.9
3	3.1	1.4	15	72.3	23.0	40	109.4	35.2
4	7.3	2.5	18	82.9	26.5	45	110.1	35.7
5	12.4	4.1	21	89.8	28.7	50	110.5	36.4
7	18.7	6.2	24	95.2	30.6	55	110.7	36.7
9	29.2	9.3	27	100.1	32.0	60	111.2	36.9

3 试验结果与分析

3.1 劈裂注浆开挖结果分析

注浆7 d后,用挖机开挖试验孔1和2至3 m深,对裸露的注浆桩芯及桩周浆脉形状进行初步观察,并用钢卷尺测量浆脉扩散距离及其厚度,观察分层劈裂注浆效果.现场开挖情况及效果如图8所示.

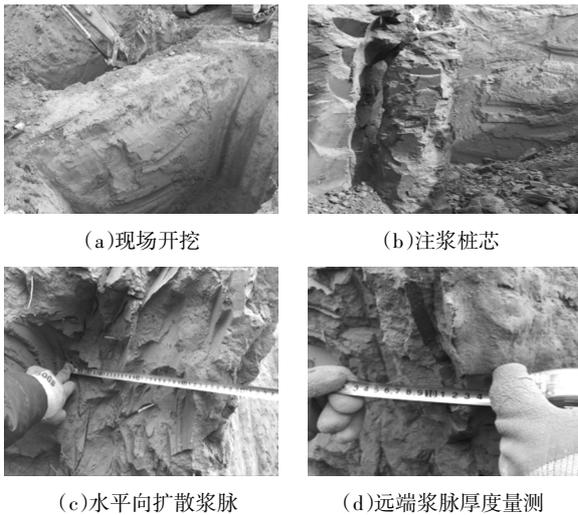


图8 现场开挖及效果图

Fig.8 Site excavation and effect

从图8(b)可看出,试验孔1、2形状良好且大致呈圆柱形,在桩顶以下24 cm处开始出现不规则形浆脉.图8(c)显示,在同一平面上,浆脉以桩芯为中心向外逐渐扩散,由于上部土层相对疏松,浆脉伸展长度较下部土体亦大,长度控制在39~52 cm;其次,也可清楚地看到,在土层松软处,且注浆压力较大时,浆液会在钢花管开孔处喷射而出,劈裂土体,浆脉近似呈“十”字形分布;当某一侧土体松软时,浆液会优先劈裂松软土体,涌入大量浆液,使得压力降低,不易劈裂其他方向上的土体,这时浆脉会近似呈“Y”形分布;各层土体浆脉数量保持在3~5之间;在竖向,上部土体较为松软,使得浆脉纵向相连,类似“片状”体,从而增强了浆脉的竖向抗剪能力,同时提高了对桩周土体的挤密作用,使桩土作用更加协调,增强了复合地基的承载能力;靠近桩芯的浆脉厚度较大,无法对其准确测量,粗略估计在4~7 cm之间,远端浆脉厚度较小,在0.1~0.9 cm之间,如图8(d)所示.综上,在西北湿陷性黄土区采用钢花管两次、分层的劈裂注浆方式是可行的,且劈裂效果良好.

3.2 静载荷试验结果分析

对天然地基区域1、2、3的静载荷试验数据进行整理,可得各区域 $Q-s$ 关系曲线,如图9所示.由图可知,天然地基沉降速率随荷载增加逐渐增大,说明该地区土质较为均匀;区域1、2沉降曲线较为相近,当荷载增加至140 kN时,二者沉降速率均出现明显增大,沉降量迅速增加至10 mm,说明已达到天然地基的极限承载能力,取上一级荷载126 kN为其极限荷载;区域3的沉降曲线明显区别于区域1、2,当荷载超过84 kN后,其沉降速率迅速增加,加载至126 kN时,沉降量迅速增大至10 mm,取上一级荷载112 kN为其极限荷载;与动力触探试验结果基本相同,取三者的均值120.8 kPa作为天然地基的承载力特征值.

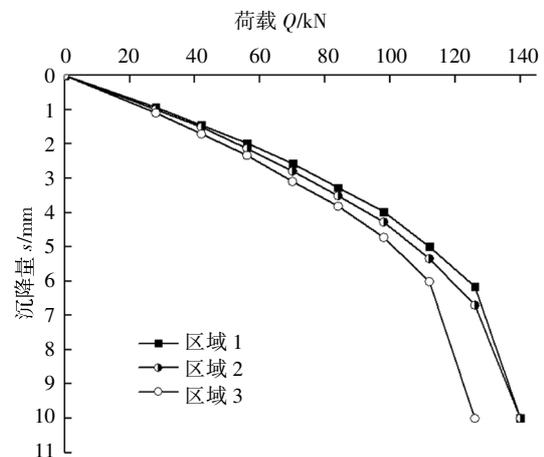


图9 天然地基各区域 $Q-s$ 曲线图

Fig.9 $Q-s$ curve of natural foundation

对1号、5号、8号及18号单桩复合地基静载荷试验数据进行处理,可得复合地基 $Q-s$ 关系曲线,如图10所示.曲线显示,各试桩的沉降曲线基本相同,0~200 kN时均处于线弹性阶段,桩土作用协调、共同承担荷载;200~360 kN时处于塑性阶段,土体被压缩,部分浆脉被剪断,桩体相对土体开始向下移动;360~400 kN时处于破坏阶段,沉降量迅速增大,复合地基丧失原始桩土结构,因此可判断1号、5号、8号及18号单桩复合地基的极限承载力均为716 kPa,承载力特征值均为358 kPa.

荷载较小时,各试桩的沉降变化高度一致,当加载超过120 kN后,开始出现分化,1号桩与5号桩的沉降速率逐步快于8号桩与18号桩,而8号桩的沉降速率变化最为缓慢.原因是1号、5号桩位于注浆区域的最外侧,注浆后的土体依然存在部分缺陷,而位于注浆区域内侧的18号桩及中心处的8号桩,由于

相邻桩芯及浆脉的挤密作用,使得土体更加密实,土体缺陷也得到充分弥补,因此其注浆加固效果也更加明显.针对此类问题,可适当加大外围注浆孔的注浆量,以增加外围土层中的浆脉数量,填充土体空隙,挤密桩周土体,提高承载能力.与前面天然地基相比,劈裂注浆法加固后的黄土地基承载能力较其提高近 3 倍,极大地改善了黄土的工程性质,说明该方法用于加固湿陷性黄土地基是可行的.

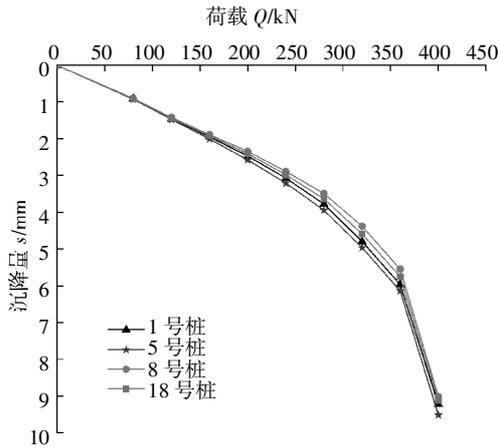


图 10 复合地基各桩 Q-s 曲线图

Fig.10 Q-s curve of in composite foundation

3.3 浸水试验结果分析

依据表 4 中所记录的原始数据,将其绘制成如图 11 所示的湿陷量随浸水时间变化的关系曲线图.曲线反映出,天然地基在注水停止 5 d 后湿陷量增长缓慢且呈现收敛趋势,劈裂注浆复合地基在注水 27 d 时就呈现收敛趋势,湿陷已基本完成,再次注水对其湿陷量影响不大;注水 60 d 后天然地基的湿陷量达到了 111.2 mm,而复合地基的湿陷量仅有 36.9 mm,能够有效消除黄土近 67% 的湿陷性.

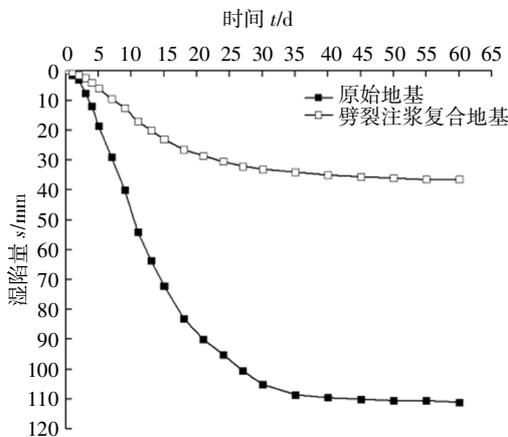


图 11 湿陷量与浸水时间变化关系

Fig.11 Relation between the amount of subsidence and the soaking time

4 复合地基沉降量计算公式推导

前面部分对劈裂注浆(如图 12 所示)现场试验、承载及湿陷性等方面做了研究,并用同样手段对场地内建筑物进行了地基注浆加固.以此为契机,将试验数据与实际工程相结合,在桩土变形协调假设^[21]的基础上,提出一种适用于桩径较小的刚性桩复合地基沉降计算新方法,但其也有一定的局限性,即当桩径较大时,桩体下沉对桩周土影响较大,此时桩体沉降量与桩周土沉降有所差异,与该计算方法假设相悖.

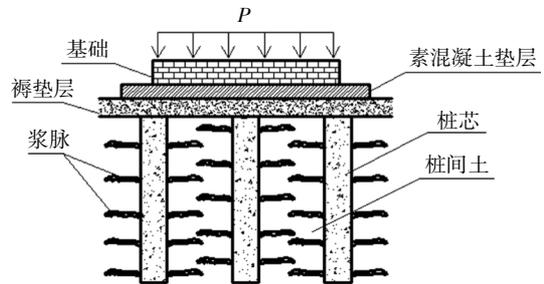


图 12 劈裂注浆示意图

Fig.12 Diagram of splitting grouting

4.1 桩土应力比推导法

与独立算法相同,该方法认为桩土变形协调一致,在荷载作用下,桩体的沉降等于桩间土沉降 s_s ,而桩体沉降由褥垫层压缩量 s_u 、桩身压缩量 s_c 及桩端下土体压缩量 s_z 组成,则满足式(1):

$$s_u + s_c + s_z = s_s \tag{1}$$

桩端下土体压缩量 s_z 可认为由桩端应力作用而成,桩端应力 σ_z 为:

$$\sigma_z = \frac{Q_p - fA_r}{A_p} \tag{2}$$

式中: Q_p 为桩顶荷载, kN; f 为桩侧摩阻力, kPa; A_r 为桩侧表面积, m^2 ; A_p 为单桩桩身横截面面积, m^2 .

则由分层总和法可求得桩端下土体压缩量 s_z :

$$s_z = \sum_{j=1}^n \frac{\sigma_z}{E_{sj}} (z_j \bar{\alpha}_j - z_{j-1} \bar{\alpha}_{j-1}) \tag{3}$$

式中: E_{sj} 为基底下第 j 层土的压缩模量, MPa; z_j 为桩端下第 j 层土底部深度, m; $\bar{\alpha}_j$ 为基底下第 j 层土底部的平均附加应力系数.

当桩径较小时,可认为桩间土沉降 s_s 不受桩侧摩阻力影响,仅由桩间土的附加应力 σ_s 作用而成,如式(4).

$$s_z = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{s_i}}{E_{s_i}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (4)$$

褥垫层压缩量 s_u 、桩身压缩量 s_c 则可用桩顶的附加应力 σ_p 表示为:

$$\begin{cases} s_u = \frac{\sigma_p h}{E_c} \\ s_c = \frac{(\sigma_p + \sigma_z)L}{2E_p} \end{cases} \quad (5)$$

式中: L 为基础长度, m; h 为加固区顶部到下卧层顶部的深度, m; E_c 为垫层压缩模量; E_p 为桩身压缩模量, MPa.

联立式(1)~式(5)可得:

$$\frac{\sigma_p h}{E_c} + \frac{(\sigma_p + \sigma_z)L}{2E_c} + \sum_{j=1}^n \frac{\sigma_{z_j}}{E_{s_j}} (z_j \bar{\alpha}_j - z_{j-1} \bar{\alpha}_{j-1}) = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{s_i}}{E_{s_i}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (6)$$

由桩土变形协调可知, 桩顶应力 σ_p 与桩间土应力 σ_s 还满足关系式:

$$n\sigma_p A_p + \sigma_s A_s = F \quad (7)$$

式中: A_s 为基底桩间土面积, m^2 ; F 为上部结构总荷载.

联立式(6)(7)可得桩土应力比 n , 将 σ_s 回代入式(4)就可得复合地基的总沉降量.

4.2 同期建筑地基注浆加固沉降监测

将建筑物四周各观测点的沉降数据绘制成图 13

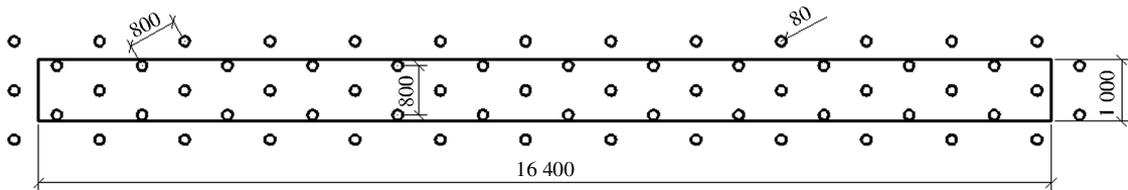


图 14 条形基础尺寸及注浆桩分布示意图(单位:mm)

Fig.14 Strip foundation size and grouting pile distribution(unit:mm)

计算基础上部总荷载约为 2 800 kN, 则求得基底处应力 170.73 kPa, 土体的自重应力 25.35 kPa, 因此基底附加应力为 145.38 kPa.

由公式(2)求得桩端应力 σ_z 为:

$$\sigma_z = \frac{Q_p - fA_r}{A_p} = \frac{0.02Q_p - 7.5 \times 7.03}{0.02} = \sigma_p - 2\ 636.25 \text{ (kPa)}$$

再用分层总和法求出 s_z , 沉降计算见表 5, 可知, $s_z = 0.191\ 2\sigma_p - 504.051 \text{ (mm)}$.

再用分层总和法求出桩间土沉降 s_s , 沉降计算统计见表 6, 可知, $s_s = 0.44\ \sigma_s \text{ (mm)}$.

将各参数代入公式(4)(6)(7), 求得最终沉降量

所示曲线, 表明建筑物基础发生均匀沉降, 整体沉降速率一直减缓, 并呈现收敛趋势, 在安全使用范围之内. 因为测点 1、2 位于排水沟渠附近, 导致其沉降稍大于观测点 3、4, 从而证明了劈裂注浆加固方式处理湿陷性黄土地基的有效性.

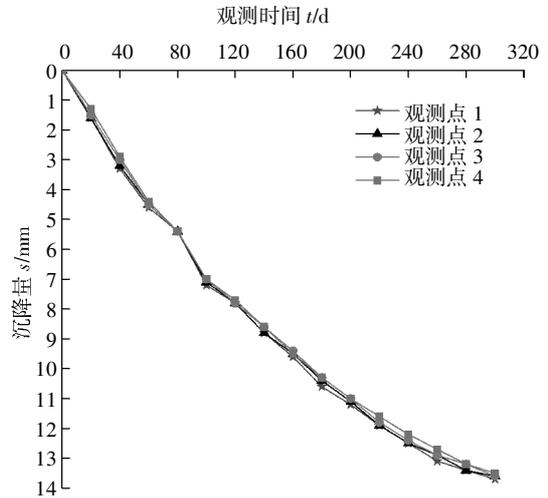


图 13 建筑物沉降量随时间变化

Fig.13 Settlement changes with time of building

4.3 计算实例及对比分析

由图 13 可看出, 建筑物沉降基本均匀, 因此取其竖向的某一条形基础进行分析, 该条形基础尺寸及基础下的注浆桩分布如图 14 所示.

为 23.945 mm.

考虑到文章篇幅, 采用其他计算方法^[22]求得劈裂注浆后复合地基沉降量的具体计算过程已省略. 将各方法的沉降计算结果汇总于表 7.

表 5 沉降计算表

Tab.5 Settlement calculation

土层	z_j/b	$\bar{\alpha}_i$	E_{s_j}/MPa	$\Delta s/\text{mm}$
④	1.3	0.839 6	9.3	0.117 4 σ_s
⑤	6.9	0.284 4	11.8	0.073 8 σ_s
Σ	—	—	—	0.191 2 σ_s

表6 沉降计算统计表

Tab.6 Statistical of settlement calculation

土层	z_i/b	$\bar{\alpha}_i$	E_{si}/MPa	$\Delta s/\text{mm}$
①	0.4	0.9940	80.0	$0.003\ 9\sigma_s$
②	1.7	0.847 2	5.7	$0.2\sigma_s$
③	7.4	0.428 4	9.3	$0.186\sigma_s$
④	8.7	0.386	9.3	$0.020\ 2\sigma_s$
⑤	14.3	0.265 2	11.8	$0.03\sigma_s$
Σ	—	—	—	$0.44\sigma_s$

表7 沉降计算结果汇总表

Tab.7 Summary of settlement calculation results

类别	桩土应力比	计算值/mm	误差/%
复合地基 技术规范法	—	27.114	27.87
建筑地基 技术规范法	—	16.340	22.94
独立算法	线性	102.13	36.21
	双曲线	83.204	25.53
推导法	49.680	23.945	12.93
试验法	50.650	21.204	0

以试验法记录沉降量为基准值,其他算法误差相对较大,推导法所得桩土应力比与试验法基本相同,表明了该方法的实用性。

5 结论

1)钢花管两次、分层劈裂注浆后,每层土体浆脉数量在3~5之间,呈“Y”形或“十”形分布;在水平方向扩散距离超过约40 cm,相邻桩体间的浆脉出现相互连接;浆脉竖向相连呈“片状”,增强了复合地基的整体性与竖向抗剪能力。

2)劈裂注浆法加固处理后(承载力特征值为358 kPa)的黄土地基承载力较原有地基(120.8 kPa)提高了近3倍,极大地改善了黄土的工程性质,也表明了劈裂注浆复合地基应用于工程实践的可行性。

3)注水60 d后,同一场地劈裂注浆加固方式(湿陷量为36.9 mm)较天然地基(湿陷量为111.2 mm)

能够有效消除黄土超过67%的湿陷性,表明该方法可用于处理湿陷性黄土地基。

4)为劈裂注浆复合地基桩土应力比的确定及沉降计算提供了一种新思路、新方法,且计算简便、适用性较强。

参考文献

- [1] 宋戛,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)
- [2] 马闫,王家鼎,彭淑君,等.大厚度黄土自重湿陷性场地浸水湿陷变形特征研究[J].岩土工程学报,2014,36(3):537—546.
MA Y,WANG J D,PENG S J,*et al.* Immersion tests on characteristics of deformation of self-weight collapsible loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(3):537—546. (In Chinese)
- [3] 宋戛,罗小博.超厚湿陷黄土区SHR—SRC结构施工过程沉降监测与分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(3):54—62.
SONG Y,LUO X B.Settlement monitoring and analysis of SHR—SRC structure in the construction process of ultra-thick collapsible loess area[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2020,47(3):54—62. (In Chinese)
- [4] 周茗如,彭新新,苏波涛,等.普通水泥与超细水泥注浆性能分析及其黄土注浆效果对比研究[J].硅酸盐通报,2017,36(5):1673—1678.
ZHOU M R,PENG X X,SU B T,*et al.* Grouting performance of ordinary cement and superfine cement and comparison of grouting effect in loess [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2017,36(5):1673—1678. (In Chinese)
- [5] 周书明,陈建军.软流塑淤泥质地层地铁区间隧道劈裂注浆加固[J].岩土工程学报,2002,24(2):222—224.
ZHOU S M,CHEN J J. Hydrofracture grouting in soft flowing mucky ground for a metro tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(2):222—224. (In Chinese)
- [6] 孙锋,张顶立,王臣,等.劈裂注浆抬升既有管道效果分析及工程应用[J].岩土力学,2010,31(3):932—938.
SUN F,ZHANG D L,WANG C,*et al.* Analysis of raising pipeline by fracture grouting and its application [J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(3):932—938. (In Chinese)
- [7] 王开洋,李亚军,李果,等.二次注浆竖向钢花管微型桩水平承载力试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(8):1707—1717.
WANG K Y,LI Y J,LI G,*et al.* Experimental study on the horizontal bearing capacity of vertical steel floral tube micropiles with twice

- grouting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(8): 1707—1717. (In Chinese)
- [8] 周茗如, 卢国文, 王腾, 等. 结构性黄土劈裂注浆力学机理分析[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 169—181.
ZHOU M R, LU G W, WANG T, *et al.* Mechanism analysis of structured loess fracturing grouting [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 169—181. (In Chinese)
- [9] 马连生, 王腾, 周茗如, 等. 黄土劈裂注浆土体裂纹扩展模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 962—967.
MA L S, WANG T, ZHOU M R, *et al.* Study on the crack extended model for loess with fracturing grouting [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14 (4): 962—967. (In Chinese)
- [10] LI P, ZHANG Q S, LI S C, *et al.* Time-dependent empirical model for fracture propagation in soil grouting [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 94: 103130—103138.
- [11] SCHWEIGER H F, KUMMERER C, OTTERBEIN R, *et al.* Numerical modelling of settlement compensation by means of fracture grouting[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1): 71—86.
- [12] LISA H, CHRISTIAN B, ÅSA F, *et al.* A hard rock tunnel case study: Characterization of the water-bearing fracture system for tunnel grouting [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 30: 132—144.
- [13] MAJDI A, MIRZAZADE A. Prediction of minimal rock mass grouting pressure based on Newton's second law and principles of fracture mechanics[C]//Proceedings of 51th US Rock Mechanics. San Francisco: American Rock Mechanics Association, 2017: 3477—3483.
- [14] STRØMSVIK H. The significance of hydraulic jacking for grout consumption during high pressure pre-grouting in Norwegian tunnelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 357—368.
- [15] 邝健政, 咎月稳, 王杰, 等. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1—2.
KUANG J Z, ZAN Y W, WANG J, *et al.* Geotechnical grouting theory and engineering examples[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1—2. (In Chinese)
- [16] 混凝土用水标准: JGJ 63—2006 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 3—4.
Standard of water for concrete: JGJ 63—2006 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 3—4. (In Chinese)
- [17] 张建斌. 黄土地基劈裂注浆试验研究及工程应用 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019: 13—38.
ZHANG J B. Experimental study and engineering application of split grouting in loess foundation [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019: 13—38. (In Chinese)
- [18] 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: 37—40.
Code for design of building foundation: GB 50007—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 37—40. (In Chinese)
- [19] 陈培, 房琛, 丁士君. 灰土挤密桩在湿陷性黄土地区电厂冷却塔地基处理中的应用[J]. 建筑科学, 2013, 29(1): 75—79.
CHEN P, FANG C, DING S J. Application of lime soil piles in collapsible loess foundation treatment of cooling towers for fossil-fuelled power plants [J]. Building Science, 2013, 29(1): 75—79. (In Chinese)
- [20] 马文辉, 杨成永, 彭华, 等. 大直径泥水盾构下穿地铁挡墙路基沉降控制 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 44—53.
MA W H, YANG C Y, PENG H, *et al.* Settlement control on retaining wall embankment affected by underneath traversing large-diameter slurry shield tunnels [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(3): 44—53. (In Chinese)
- [21] 杨光华, 范泽, 姜燕, 等. 刚性桩复合地基沉降计算的简化方法 [J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 76—84.
YANG G H, FAN Z, JIANG Y, *et al.* A simplified method for calculating settlement of rigid pile composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 76—84. (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, 2018: 49—59.
LUO X B. Research on settlement law of super-high-rise pile-raft structure foundation in Longdong region [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018: 49—59. (In Chinese)