

注浆 + 静压桩法在既有建筑软弱回填地基加固中的应用

马亮¹, 麻升刚¹, 张繁祥², 赵翎显¹, 王伟江¹

(1. 甘肃省建设工程检验检测认证中心有限公司, 甘肃 兰州 730030;

2. 甘肃省建筑科学研究院(集团)有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对某单层砖混房屋地基回填土层厚、场地布线错综复杂、施工空间受限、设备防护难度大以及减沉加固效果要求高等条件下对房屋地基基础进行加固处理问题, 通过对地基不均匀沉降和墙体开裂原因的分析, 采用了注浆 + 静压桩相结合的加固处理方法, 消除既有构筑物的沉降问题, 以加固后地基密实度和地基沉降为控制目标, 对加固处理效果进行了分析评价。结果表明: 地基注浆 + 静压桩对于软弱回填地基加固处理效果较好, 可有效地改善软弱回填土地基的性质, 提高地基土承载力; 瞬态瑞雷面波法和静载试验法对地基注浆加固质量和静压桩施工质量可有效进行评价。

关键词: 不均匀沉降; 地基加固; 地基注浆; 静压桩; 软弱回填地基

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0079-06

Application of Grouting and Static Pressure Pile Method in Strengthening Weak Backfill Foundation of Existing Buildings

MA Liang¹, MA Shenggang¹, ZHANG Fanxiang², ZHAO Lingxian¹, WANG Weijiang¹

(1. Gansu Construction Engineering Inspection and Testing Certification Center Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730030, China;

2. Gansu Academy of Building Research (Group) Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In view of the problems of thick backfill soil layer of single-storey brick-concrete house foundation, complex layout of site, limited space, difficulty in equipment protection and high requirements for settlement reinforcement effect, the foundation of the house was reinforced by combining grouting and static pressure pile, which eliminated settlement problem of existing structures and took the compactness of reinforced foundation and the settlement of foundation as the control objectives. The effect of reinforcement treatment was analyzed and evaluated. The results show the reinforcement treatment of base grouting static pressure pile has a good effect on the reinforcement treatment of soft backfill foundation, which can effectively improve the properties of soft backfill foundation and increase the bearing capacity of foundation soil; transient surface wave method and static load test method can effectively evaluate the quality of grouting reinforcement and static pressure pile construction of the foundation.

Keywords: uneven settlement; foundation reinforcement; foundation grouting; static pressure pile; soft backfill foundation

建筑物在施工过程中由于地基处理不当或者因为在房屋使用的过程中因不利因素的影响, 致使建筑物地基存在较大孔隙发育、土体不密实等现象, 久而久之会导致建筑物地基发生不均匀沉降, 引起建

筑物整体倾斜、结构构件变形、开裂等事故发生。地基出现不均匀沉降, 如果得不到及时处理, 不仅会影响房屋正常使用功能, 还会影响房屋结构安全。现阶段我国基建已基本形成规模, 大型建设项目逐渐

减少,既有建筑物的检测、鉴定加固逐渐成了新的热门研究方向。

在我国中西部地区存在大面积湿陷性黄土层,由于在设计阶段对湿陷性影响预估不足,施工过程中对黄土地基处理不当或建筑后期维护不足等原因,许多既有建筑正面临着由地基不均匀沉降引起的墙体开裂、基础开裂、建筑物倾斜等问题。针对以上问题,科研人员对此进行了深入研究,同时也涌现出很多比较实用的加固技术和方法,李晓健等^[1]提出了注浆加固浆液填充率、填充率比例系数和计算方法,并探讨了注浆加固压力控制和沉降发展规律。王逢睿等^[2]以实际加固工程为例,研究了锚杆静压桩属于“干作业”地基加固,表明该方法对地基扰动较小,加固效果明显。张磊磊^[3]结合工程实例对采用地质雷达法、重型动力触探试验和钻孔取芯法分别对地基注浆效果进行检测评价,并对检测结果进行对比分析和验证。赵卫全等^[4]采用水泥膏浆+稳定性浆液联合灌浆加固处理对回填层孔隙大、淤泥层深厚等复杂场地电缆沟进行加固处理,并在加固完成后对后期沉降进行监测,表明地基沉降基本稳定、工作正常。李林等^[5]以坑式静压桩托换加固地基基础实际工程为例,介绍了检测鉴定、加固设计和施工的详细过程,并指出坑式静压桩法加固地基基础的弊端。逯焕波等^[6]结合工程实例,以场地地质条件和沉降观测资料,对软土地区锚杆静压桩加固地基基础的有效性进行了进一步验证。姜伯霄^[7]通过对建筑物倾斜超限和地基不均匀沉降原因分析,提出采用静压注浆对地基进行处理,有效解决了建筑物的沉降持续发展问题。薛丽影等^[8]将注浆加固法在建筑物纠偏和不均匀沉降控制方面以实例进行了应用,明确了注浆加固施工需要注意的问题和要点。陈冲等^[9]采用工业废渣为原料配制的土体固结粉,通过室内试验和室外试验分析了其在加固软土地基的适用性。

地基加固通常采用注浆加固法、静压桩法、加大基础底面积法等加固方法^[10],并在实际加固工程中得到了广泛应用和创新。根据建筑物不同的结构形式和沉降变形特点,针对不同地质情况和基础形式,选择合适的加固方法和制定合理的加固方案是有效处理地基沉降问题的关键。

本文依托甘南地区某单层砖混结构房屋地基基础加固工程,通过对其不均匀沉降和墙体裂缝进行综合分析,提出注浆+静压桩加固的解决方案,最后对加固效果进行监测分析,可为该地区类似地基加

固工程提供参考。

1 工程概况

1.1 房屋布设及结构

该房屋建造于2016年,结构形式为单层砖混结构,长16.5 m,宽7.5 m,层高4.5 m,主体高度4.7 m,建筑面积约137.6 m²,房屋平面布置如图1所示。该房屋承重墙体采用MU15普通烧结砖及M5混合砂浆砌筑,外墙厚度370 mm,室内外高差40 mm~140 mm,屋面采用混凝土现浇板,板厚约170 mm,女儿墙宽度280 mm,高度570 mm,基础采用钢筋混凝土条形基础,基础埋深1.5 m,宽度为1 200 mm,高度为250 mm,下设90 mm厚混凝土垫层,持力层为砾类土。通过现场检测和调查,房屋地基出现不均匀沉降,具体表现为房屋6×B区域不均匀沉降最为明显,承重墙体斜向开裂较其他部位较为严重,地基相对沉降量最大达319.0 mm。

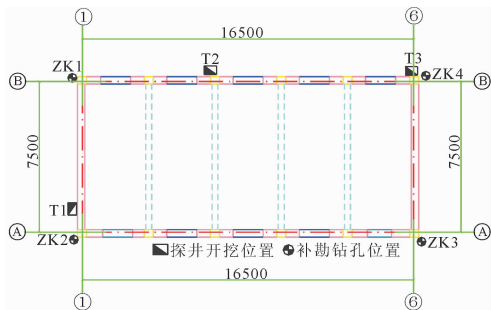


图1 平面布置图(单位:mm)

1.2 工程地质

该场地位于甘肃省甘南藏族自治州临潭县,地貌单元属高山丘陵地貌。通过现场补勘,场地在勘探深度范围内,场地地层结构较为简单,上部地层主要为人工填土,下部为第三系泥岩,地层自上而下分别为杂填土、素填土和强风化泥岩。分述如下:①杂填土层,层厚3.0 m,黄褐色-杂色,主要成分以回填的强风化泥岩为主,混少量中风化泥岩碎块、卵石、建筑垃圾等,土质均匀性一般,稍密,稍湿,其中顶部0.0 m~0.3 m为混混凝土坪。②素填土层,层面埋深3.0 m,层面标高3 039.00 m,层厚3.5 m。黄褐色,主要成分以回填的粉土为主,土质均匀性一般,混少量未腐殖的植物根系,有轻微腥臭味,稍密、湿。③强风化泥岩,分布于整个场地,最大揭露厚度10.8 m,层面埋深3.0 m~6.5 m,层面标高3 039.00 m~3 042.52 m。青灰色-杂色,泥质结构,厚层状构造、泥质胶结、胶结程度一般,原岩成分以黏土矿物为

主。局部混大量中风化泥岩碎块,岩心较破碎,多呈短-长柱状,长约 5 cm~40 cm,锤击易碎,有明显凹痕,用镐可挖,较难钻进。

场地地势开阔平坦,无地面沉陷、采空区、岩溶等不良地质作用,无暗浜、古河道等不利埋藏物。

本次勘察,在勘探深度范围内所有勘探点均未出露地下水,场地周边无水源地及河流,无水力水系联系,可不考虑地下水对本工程的影响。地层基本力学参数如表 1 所示。

表 1 岩土层物理力学参数

岩性	层面深度/m	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	承载力特征值/kPa
杂填土	0.0	10	20	7.0	80
素填土	3.0	16	24	6.0	70
强风化泥岩	3.0~6.5	20	29	30.0	400

2 裂缝和地基沉降成因分析

2.1 裂缝形态分析

对该房屋承重墙墙体出现不同程度的裂缝进行了测绘和分析,见图 2,裂缝具有以下特点:①裂缝分布:裂缝在纵、横墙上均有分布,大部分门窗洞口处出现轻微裂缝,裂缝具有下重、上轻的特征。②裂缝形式:墙体裂缝主要为斜向裂缝,有少量水平裂缝及竖向裂缝。③裂缝宽度:墙体裂缝宽度在 0.2 mm~3.5 mm 之间,部分裂缝贯通墙厚。

经分析,承重墙体斜向裂缝为地基基础不均匀沉降造成的裂缝;门窗洞口处部分轻微裂缝为温度-应力集中裂缝;墙体部分水平、竖向裂缝为混凝土构件与砌体结构构件接茬处两种材料在温度及收缩作用下变形不协调所产生的构造裂缝。

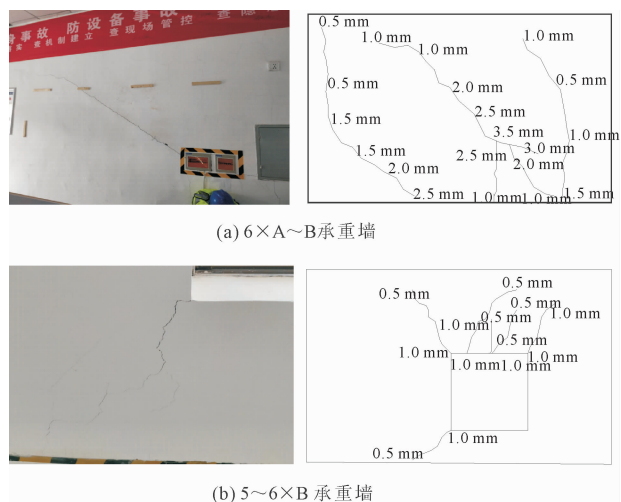


图 2 承重墙裂缝分布及形态

2.2 地基沉降分析

该房地基沉降量介于 0.0 mm~319.0 mm 之间,局部倾斜率则介于 3.89‰~30.63‰ 范围内,超出规范的相关要求^[11]。

该房屋两侧设置排水沟,排水沟宽度为 400 mm,深度为 850 mm,距房屋直线距离 700 mm~4 100 mm,未做任何防水处理,排水沟局部侧墙破损、开裂,排水沟局部存在积水,排水不畅。根据现场实际情况,在该房屋周围开挖 3 个探井,平面布置图见图 1,并取探井开挖(如图 3 所示)土样进行土工试验检测,检测结果见表 2。



图 3 探井开挖

表 2 土工试验结果

探井编号	取样深度/m	试样密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	最大干密度/(g·cm ⁻³)	压实系数
T1	1.5	1.67	25.1	1.34	1.75	0.76
T1	2.5	1.55	13.9	1.36	1.80	0.75
T1	3.0	1.70	17.1	1.45	1.80	0.81
T2	1.5	1.69	16.2	1.46	2.08	0.70
T2	2.5	1.61	22.2	1.32	1.75	0.75
T2	3.0	1.59	23.8	1.28	1.75	0.73

通过现场探井开挖调查,该房屋基础埋深约 1.5 m,回填土和地基土存在不同程度的浸水现象,根据表 2 土工试验结果可知,T1 探井开挖深度 3.0 m,土样含水率 17.1%~25.1%,压实系数 0.75~0.81;T2 探井开挖深度 3.0 m,含水率 16.2%~23.8%,压实系数为 0.73~0.75;T3 探井开挖至 2.0 m 处,排水沟靠近房屋一侧墙体底部由于排水沟渗水影响,墙体底部开始坍塌,基础底部局部脱空,探井周围杂填土亦开始塌落,故停止探井开挖,土样含水率 22.9%~29.9%。结果表明:T1、T2 和 T3 探井部位回填土、地基土含水率、压实系数不满足《建筑地基基础设计规范》的要求^[11];地基土存在不同程度的浸水,含水率普遍偏高,部分已达到饱和状态,原有

持力层填土含水率高,承载力极大削弱,造成房屋较大的不均匀沉降。

3 地基加固方案设计

3.1 工程特点及加固难点

该房屋地基基础加固主要难点是:①杂填土及素填土层含水率高、孔隙率较大、压缩性大、承载力低、深度差异较大、排水固结不充分、后期变形大,为确保地基注浆加固效果,减少加固后的附加沉降,注浆深度需穿过杂填土及素填土层,进入强风化泥岩层,地基处理深度较大。②房屋内部设置带高压设备,布线错综复杂、施工空间受限,施工中对安全要求较高。③地基注浆加固过程中需要选用体积小的施工设备,既要做好房屋内设施设备防护,又要保证设施设备正常工作,处理时需要实时监测,精确控制注浆压力和注浆量,防止浆液外喷。④房屋附近有排水沟、污水管沟和电缆沟等分布,场地布线错综复杂,注浆孔位布置受管线影响时需调整孔位,注浆参数也应实时调整,避免注浆损坏管线。⑤为了保证房屋安全,设备正常工作,防止房屋沉降进一步加剧,地基加固工作要求 3 个月完成,工期紧、任务重,处理效果要求高。

3.2 加固方法选择

注浆加固法具有施工灵活,受空间限制较小,对原有结构影响较小等优势,通过高压对地基土劈裂注浆,使得地基土产生微小裂隙,浆液填充土中的裂隙,浆液硬化后地基土固结,孔隙比降低,承载力提高,但是在注浆过程中,浆液扩散范围较大,浆液会向地基外扩散,造成无效注入损失,处理效果可控制性较差^[12]。静压桩加固施工时采用上部既有建筑自重作为反力系统,采用千斤顶将静压桩段分段压入地基土,具有施工速度快,无振动、噪音和污染等优点,且处理效果可控,不影响正常使用。

该房屋地基土为杂填土及素填土层,厚度差异较大,普遍含水率较高,为了不影响正常生产工作,根据场地地质情况和现场条件,选用注浆+静压桩复合加固法,其实质就是刚性桩与改善后土体共同形成复合地基的过程,经过注浆加固后,静压桩和改善后的土体形成了一个整体承重系统,上部结构的荷载由这个系统共同承担,协同变形,共同工作,同时发挥两种工艺各自的优势和特点。

3.3 地基注浆设计

地基注浆采用水泥和水玻璃双液型混合浆液,水泥采用普通硅酸盐水泥(P. O42.5 级),水泥浆水

灰比为 1:1,水玻璃模数为 3.0,掺量为水泥用量的 1%,并掺入膨润土防止浆液离析沉淀,掺量为水泥用量的 3%。注浆孔采用钻机成孔,孔径 100 mm,钻至设计标高后插入注浆孔,注浆管采用下部钻眼的金属花管,注浆孔深度基础底标高以下 2.0 m~6.5 m,具体深度以现场填土埋深确定,间距 1.0 m,梅花布置,共计布置注浆孔约 226 个;施工工艺流程为:定位→钻孔→插管→注浆→提管→复插管→复注浆→拔管→封孔。地基加固平面布置图如图 4 所示。

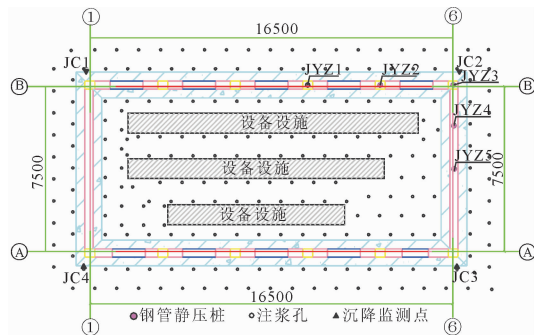


图 4 地基加固平面布置图(单位:mm)

3.4 钢管静压桩设计

在房屋 4~6 × 1/A~B 区域设置 5 根钢管静压桩,钢管静压桩 $D = 168$ mm,壁厚 8 mm,钢材等级为 Q235B,桩段长度由场地净高和顶压设备尺寸确定,宜长不宜短,一般取 1.0 m~2.5 m,桩长约 5.5 m,持力层为强风化泥岩层。接桩采用焊接,并设置 4 根直径 18 的锚条,钢管静压桩内灌注 M30 水泥砂浆,注浆压力不小于 0.25 MPa。施工工艺流程为:场地平整→定位放线→复核→导坑开挖→导坑支护→放桩→竖直就位→测垂直度→复核→放置千斤顶→施加压力将桩压入坑底→记录数据→卸千斤顶→第二节桩就位→测垂直度→复核→焊接→冷却 10 min→放置千斤顶→压入第二节桩→循环→压入最后一节桩→灌入砂浆→测试桩承载力→预加应力封桩→压桩完成。钢管静压桩加固拖换工艺图如图 5 所示。

4 地基加固效果分析

4.1 地基加固密实度检测

在注浆完毕后,利用瞬态瑞雷面波的频散特性,通过检测测试,分析计算得到地基注浆层频散曲线图,再通过分析频散曲线的形态特征和各分层的波速大小,反演出基底不同深度的剪切波速度。根据评判要求的层相波速标准进行评判,计算达标率,对地基注浆加固质量做出评价。

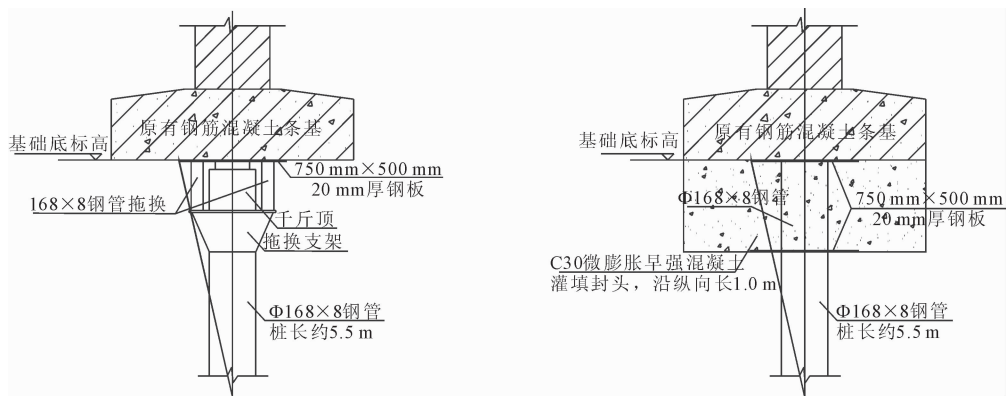


图 5 钢管静压桩加固拖换工艺图

本次面波探测具体的观测系统参数为:检波器:4.5 Hz 低频检波器,道间距 2 m,偏移距 5 m,排列长度 15 m,激发方式:18 磅大锤敲击,采样间隔 0.25 ms,采样长度 1 024 样点/道^[13-14]。

通过对每条测线采集的数据进行了处理,提取了 6 道测线的瑞雷面波频散曲线,如图 6 所示。

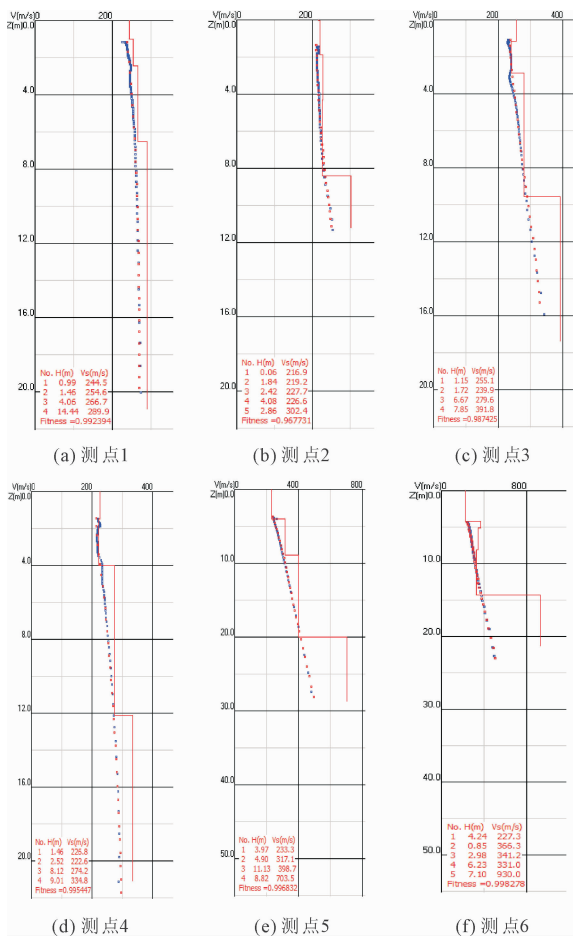


图 6 测线中心点面波频散曲线

的速度变化,通过曲线的速度变化情况,结合地质勘探资料,参照不同岩性的速度值范围,以及曲线拐点情况,以此来判定地基加固注浆是否密实,剪切波速结果如表 5 所示。

表 5 剪切波速结果

测点	测试深度 /m	剪切波速 / $(m \cdot s^{-1})$	测点	测试深度 /m	剪切波速 / $(m \cdot s^{-1})$
1	0.00 ~ 0.99	244.5	4	0.00 ~ 1.46	226.8
	0.99 ~ 1.46	254.6		1.46 ~ 2.52	222.6
	1.46 ~ 4.06	266.7		2.52 ~ 8.12	274.2
	4.06 ~ 14.44	289.9		8.12 ~ 9.01	334.8
2	0.00 ~ 0.06	216.9	5	0.00 ~ 3.97	233.3
	0.06 ~ 1.84	219.2		3.97 ~ 4.90	317.1
	1.84 ~ 2.42	227.7		4.90 ~ 11.13	398.7
	2.42 ~ 4.08	226.6		—	—
3	0.00 ~ 1.15	255.1	6	0.00 ~ 0.85	227.3
	1.15 ~ 1.72	239.9		0.85 ~ 2.98	341.2
	1.72 ~ 6.67	279.6		2.98 ~ 6.23	331.0
	6.67 ~ 7.85	391.8		6.23 ~ 7.10	930.0

由图 6 和表 5 可知,通过数值模拟和理论计算瑞雷波的频散曲线分析,证明了在均匀介质中瑞雷波的波速与频率无关,在多层介质中瑞雷波与频率密切相关,具有频散特性;通过不同地质介质层试验,分析对比注浆后实测结果和数值模拟结果,注浆后的频散曲线形态发生变化,实测频散曲线与数值模拟曲线基本一致,表明本次检测采集的数据是合理有效的;根据地勘深度资料表明,地层主要为人工填土,下部为第三系泥岩,与注浆后检测数据对比分析,注浆效果基本达到密实要求。

4.2 静压桩质量检测

在静压钢管桩施工完毕后,根据《建筑基桩检测技术规范》^[15]要求选取 2 根静压桩进行承载力检

瑞雷面波频散曲线图反映了勘探点处不同深度

测,本次检测 JYZ2 和 JYZ3,按最大试验荷载 140 kN,加载按照 10 级,首级加载按 28 kN 加载,随后每级加载 14 kN 加载。静压桩荷载(P)—沉降量(S)曲线如图 7 所示。

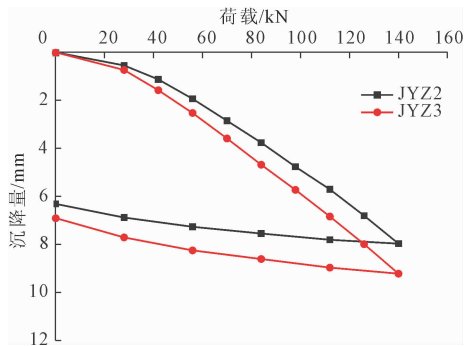


图 7 静压桩 $P-S$ 曲线

从图 7 可知,JYZ2 桩和 JYZ3 桩在加载到第 10 级荷载 140 kN 时,桩顶荷载—沉降($P-S$)曲线均呈缓变渐降型,没有出现明显拐点,此时已达到最大加载值,满足终止加载要求,开始卸载,故 JYZ2 桩和 JYZ3 桩取 140 kN 为最终加载值,此时最大沉降量分别为 7.97 mm 和 9.22 mm,最大回弹量分别为 1.66 mm 和 2.32 mm,回弹率分别为 20.8% 和 25.1%。JYZ2 桩和 JYZ3 桩加载至最大试验荷载 140 kN 时,桩顶本级沉降量分别为 1.17 mm 和 1.23 mm,综合分析,这 2 根静压钢管桩(JYZ2 桩和 JYZ3 桩)的极限承载力均大于 140 kN,承载力特征值可取 70 kN,均能够满足设计要求。

4.3 沉降观测分析

地基注浆完毕后,对该房屋进行了为期 1 年沉降观测,目前房屋已安全运行 1 年多,表面无新的裂缝产生,沉降已基本趋于稳定状态,如图 8 所示。

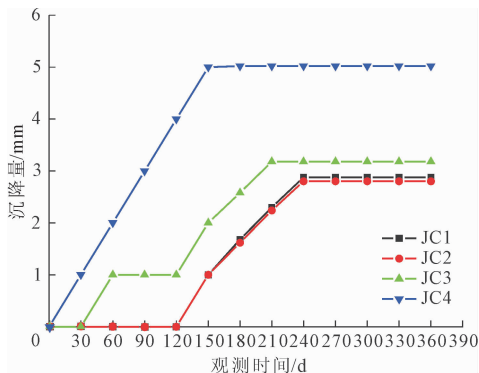


图 8 沉降观测曲线

根据图 8 沉降观测曲线可知,加固完成后该房屋 JC3 和 JC4 沉降观测点 210 d 以前沉降相对较

大,JC3 观测点累计沉降 3.18 mm,JC4 观测点累计沉降 5.02 mm,随后沉降基本趋于稳定状态,前期沉降较大主要由于注浆完成后的附加沉降造成;JC1 和 JC2 沉降观测点 120 d 以前沉降基本处于稳定状态,后期沉降逐渐增大,主要由于地基注浆和静压桩的作用,前期主要由静压桩承担上部荷载,后期注浆地基协同静压桩共同受力,240 d 左右 JC1 观测点累计沉降 2.88 mm,JC2 观测点累计沉降 2.80 mm。随后 JC1—JC4 沉降观测点基本趋于稳定状态,最后 100 d 的最大沉降速率小于 0.01 mm/d,满足《建筑变形测量规范》^[16] 的要求,表明该房屋沉降已经得到很好的控制,达到了预期效果,注浆+静压桩复合加固法加固处理效果可靠有效,静压桩在需要立即止沉的房屋地基基础加固中效果明显。

5 结论

(1) 地基土体的固结是个长期的过程,若基础下部存在松散大厚度回填土时,不可避免地会出现沉降,在施工中应考虑将基础建于可靠持力层之上或采用桩基础,同时应重视房屋基础后期维保工作。

(2) 通过采用注浆+静压桩协同受力的复合加固法在既有建筑物松散回填土层地基中进行应用,有效消除既有构筑物的不均匀沉降问题,以加固后地基密实度和地基沉降为控制目标,均达到预期效果,表明采用注浆+静压桩复合加固法行之有效。

(3) 采用瞬态瑞雷面波法和静载试验法分别对房屋地基注浆加固质量和钢管静压桩施工质量进行评价,结果表明,地基注浆效果理想,基本达到密实要求,静压桩承载力能够满足设计要求。

(4) 通过对该房屋进行了为期 1 年沉降观测,第 240 d 左右,沉降量在 2.80 mm~5.02 mm 之间,已基本处于稳定状态,表明房屋地基未再发生明显沉降,沉降差基本协调,验证了注浆+静压桩复合加固法可有效地改善软弱回填土地基的性质,提高地基承载力,为类似工程提供经验和借鉴。

参考文献:

- [1] 李晓健,宋建学.传统民居地基注浆加固技术研究[J].建筑科学,2018,34(3):123-128.
- [2] 王逢春,牛文庆,张小兵,等.湿陷性黄土地区锚杆静压桩地基加固应用研究[J].建筑结构,2019,49(6):128-133.
- [3] 张磊磊.既有房屋地基注浆加固效果检测与评价[J].湖南工程学院学报(自然科学版),2023,33(3):90-94.

(下转第 99 页)

- 加固的抗震能力研究[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(1):70-81.
- [4] 许清风, 江欢成, 朱 雷. 钢筋网水泥砂浆加固旧砖墙的试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4):77-84.
- [5] 付 洁, 王志浩. 自密实混凝土板墙加固低强度砂浆砖砌体的试验研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(3):49-52.
- [6] 耿 丽. 砖砌体面层加固技术发展综述[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(23):94-102.
- [7] 邓明科, 杨 铎, 王 露. 高延性混凝土加固无筋砖墙抗震性能试验研究与承载力分析[J]. 工程力学, 2018, 35(10):101-111, 123.
- [8] 刘海平, 董方园, 蒋芳明, 等. 纤维增强水泥基复合材料(ECC)面层加固砌体墙的压剪性能研究[J]. 工程力学, 2024, 41(12):201-214.
- [9] 吴孝鑫, 谢 群, 赵 鹏, 等. 超高延性混凝土加固砌体墙抗震性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(4):859-869.
- [10] Ranade R, Stults M, Li V, et al. Development of high strength high ductility concrete[Z]. 2nd International Rilem Conference on Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC2 - RIO). 2011:1-8.
- [11] 方霄鹏, 陈善权, 金 捷, 等. 两层双开间既有石砌体结构振动台试验研究[J]. 南昌大学学报(工科版), 2024, 46(4):420-428.
- [12] 翁志英, 胡海楠, 耿 丽, 等. 考虑材料组分影响因素的 HP-FRCC 流动性能及力学性能[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(5):125-133.
- [13] 张德和, 商吴江, 吴应雄, 等. UHP-ECC 加固 180 mm 厚砖砌体墙抗震性能试验研究及应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2025, 47(2):166-174.
- [14] 陈 煦. 薄层 UHP-ECC 加固既有砖砌体墙抗震性能试验研究[D]. 福州:福州大学, 2024.
- [15] 蒋利学, 王卓琳, 张富文. 多层砌体结构的损坏程度与层间位移角限值[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S2):263-270.
- [16] Huang Wei, Kazemi-Kamyab H, Sun Wei. Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra - high performance concrete (UHPC) [J]. Cement & Concrete Composites, 2017, 77:86-101.
- [17] 砌墙砖试验方法:GB/T 2542—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [18] 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [19] 超高性能混凝土(UHPC)技术要求:T/CECS 10107—2020[S]. 北京:中国工程建设标准化协会, 2020.

(上接第 84 页)

- [4] 赵卫全, 周建华, 熊基丞, 等. 松散回填层及深厚淤泥地基联合灌浆加固技术研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1):10-15, 21.
- [5] 李 林, 张会林. 某住宅楼裂缝事故的检测鉴定及坑式静压桩托换[J]. 建筑结构, 2006, 36(12):102-103, 108.
- [6] 逯焕波, 刘俊生, 陈昌师, 等. 软土地区锚杆静压桩地基加固应用实例研究[J]. 地基处理, 2020, 2(2):137-142.
- [7] 姜伯宵. 静压注浆法在既有建筑物地基加固中的应用[J]. 地基与基础, 2021, 48(15):135-136.
- [8] 薛丽影, 杨文生. 注浆加固法在处理建筑物不均匀沉降中的应用[J]. 建筑结构, 2011, 41(S2):399-401.
- [9] 陈 冲, 刘卫东, 闫雪明. 土体固结粉在软土地基加固中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(3):169-172.
- [10] 既有建筑地基基础加固技术规范:JGJ 123—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 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.
- [12] 陈大川, 曹荣伟, 施楚贤, 等. 某底框结构房屋地基不均匀沉降事故原因及加固处理[J]. 建筑结构, 2015, 45(9):43-47, 34.
- [13] 多道瞬态面波勘察技术规程:JGJ/T 143—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
- [14] 高国朋, 颜可珍. 软土地基加固检测评价的瑞利波法[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(3):113-116.
- [15] 建筑基桩检测技术规范:JGJ 106—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
- [16] 建筑变形测量规范:JGJ 8—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.