

【工程应用】

# 改性聚酯注浆新技术在邻近基坑保护 建筑基础加固的应用

杨玺, 苏志鹏, 梁永辉, 高星

(上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011)

**摘要:** 大型深基坑开挖时邻近保护建筑物沉降控制是基坑对周围环境影响控制的首要问题之一。对邻近大型基坑的保护建筑物采用主动隔离桩结合注浆加固的措施, 可以有效地控制保护建筑物的变形沉降, 减缓建筑物主体结构裂缝的发展。改性聚酯注浆材料具有轻质、早强、水不敏感、耐久性好等特点, 适用于微扰动既有建筑基础加固工程。介绍了一个减小基坑施工对邻近保护建筑影响的工程实例, 案例中采用改性聚酯注浆新技术对采用天然地基的房屋基础进行主动预加固, 提高地基的承载力和抵抗变形的能力, 减小房屋在基坑施工期间的沉降。主要介绍了改性聚酯注浆新技术材料的化学组成、技术指标, 以及采用该工艺进行基础加固的控制要点。轻型动探检测结果和监测数据显示, 该工艺加固的有效半径达 2 m, 对提高地基抵抗周围施工扰动影响效果较好, 在基坑施工中房屋基础沉降得到了有效控制, 保障了工程的顺利进行。

**关键词:** 基坑; 基础加固; 保护建筑; 改性聚酯注浆; 沉降控制; 微扰动; 浅基础

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0086-06

## Applications of polyurethane grouting in settlement control of adjacent preserved buildings induced by foundation excavation

YANG Xi, SU Zhi-peng, LIANG Yong-hui, GAO Xing

(Shanghai Shen Yuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200011, China)

**Abstract:** The settlement control of adjacent preserved buildings is one of the critical issues in surrounding environment control during deep foundation excavation. The measures of isolation pile combined with grouting reinforcement for preserved buildings adjacent to deep foundation pits is effective in deformation and settlement control, as well as cracks development reduction of the main structure of the buildings. Modified polyurethane (PU) grouting material has the characteristics of light-weight, early-strength, hydrophobic and high durability. It is suitable for foundation reinforcement engineering of preserved building in micro disturbance environment. A method for settlement control of preserved buildings closed to a foundation pit is illustrated with a case study. The polyurethane grouting is adopted to reinforce the building foundation, which improves the bearing capacity and the ability of resisting deformation of the foundation, and reduces its settlement during foundation excavation as well. The chemical composition, technical requirements of PU material and construction technology are mainly introduced. The monitoring and detection results show that the effective radius of reinforcement area is 2 m, the settlement of the adjacent preserved building is well controlled by polyurethane grouting.

**Key words:** excavation; foundation reinforcement; preserved building; polyurethane grouting; settlement control; micro-disturbance; shallow foundation

收稿日期: 2022-02-21

基金项目: 华东建筑设计研究院有限公司科研基金项目(17-1类-0126-地, 19-1类-0216-地); 上海市青年科技英才扬帆计划资助(19YF1436000)。

作者简介: 杨玺(1994—), 男, 云南昭通人, 硕士, 工程师, 主要从事地基处理相关工作。E-mail: yxayu2017@163.com。

# 0 引言

随着城市建设改造的推进,市区的建设用地逐渐减少,新建筑物施工往更高方向发展的同时,基坑工程也在往更深方向发展,导致在建基坑对周边环境尤其邻近既有建筑的影响越来越大。市区的历史保护建筑通常年代久远,房屋结构材料老化,整体强度及抗变形能力偏低,对周围环境变化较为敏感。对建设周边环境复杂、环境影响控制要求较高的基坑工程,其设计以变形控制为主<sup>[1]</sup>。

目前基坑及周围土体变形控制的技术,除了围护结构、支撑体系及坑内被动区加固设计外,基坑外既有保护建筑下主动区土体加固的作用效果已被相关研究及工程实践证明<sup>[2-4]</sup>。在软土地区,采用“隔离桩+主动注浆加固”的措施对邻近基坑的天然地基房屋进行基础加固的方法,能有效减轻基坑开挖引起的房屋沉降。近年来,改性聚酯注浆技术在堤坝防渗领域、公路路基加固领域、高速铁路沉降病害整治等领域已取得广泛成功的运用<sup>[5-9]</sup>。该技术以其注浆材料早强耐久、施工工艺便捷快速、施工影响微损安全等特点,在对施工条件、施工工期、施工扰动等方面要求较高的基础加固项目中应用时,相较于常规地基基础加固方法具有优势<sup>[10]</sup>。本文结合无锡市某历史文化保护建筑基础下注浆加固项目实例,介绍改性聚酯注浆新技术在减小基坑开挖对邻近保护建筑影响中的应用。

## 1 工程概况

本项目加固对象为江苏省文物保护单位,建于1923年,占地面积1433 m<sup>2</sup>,建筑面积708 m<sup>2</sup>,由3栋1层、1栋2层砖木结构建筑组成,基础为天然地基浅基础,加固范围内的基础形式砖放脚基础。该历史保护建筑于2002年,由无锡市文化局负责对其进行修复与新馆筹建工作。但由于历史条件限制,房屋材料强度偏低,整体性较差,抵抗变形能力较差,对外界影响较为敏感,部分房屋曾于2013年出现险情。

在该建筑西侧和北侧约8 m外,拟开挖约22 m深,周长约520 m,面积约13 400 m<sup>2</sup>的基坑。基坑围护方案采用板式支护结合内支撑方案,普遍区域采用厚度800 mm的地下连续墙作为外围支护,基坑东侧靠近保护建筑处采用厚度1 200 mm的地下连续墙作为外围支护,坑内竖向设置4道钢筋混凝

土内支撑。在基坑围护结构施工期间,房屋监测点沉降量持续增加,外墙多处裂缝持续发展,需进行基础加固减小基坑施工对房屋的影响。保护建筑与基坑平面位置、剖面位置关系见图1、图2。

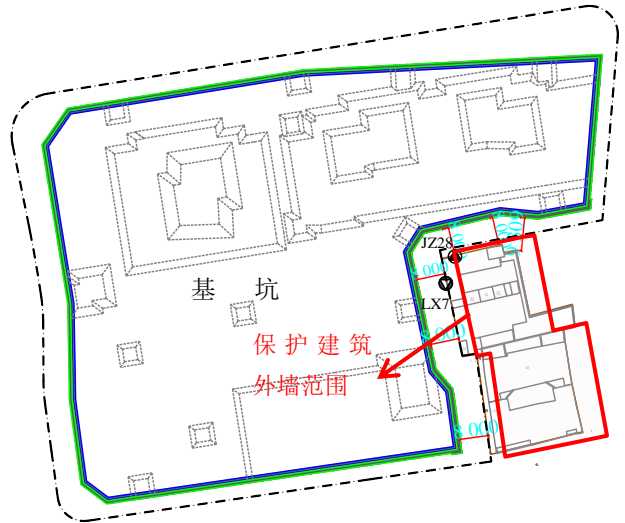


图1 保护建筑与基坑关系平面图

Fig. 1 Plan of excavation and preserved building

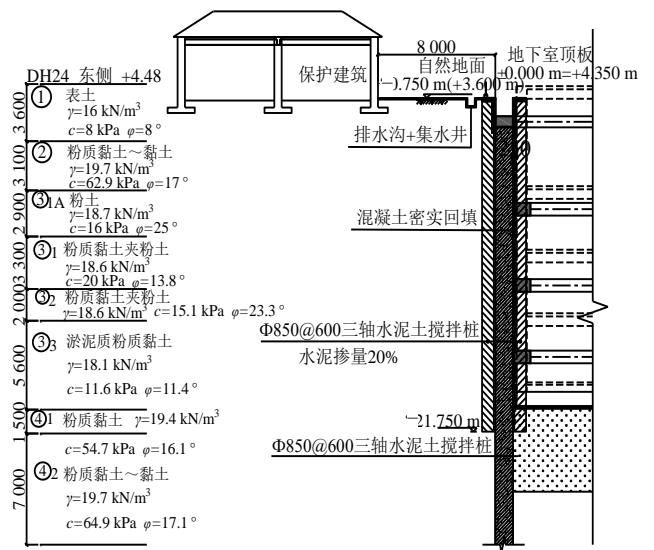


图2 保护建筑与基坑关系剖面图

Fig. 2 Cross-section of excavation and preserved building

## 2 基础加固方案

### 2.1 基础加固的必要性

(1) 根据项目资料及房屋鉴定情况,房屋主体始建于1923年,因历史条件限制房屋材料老化且强度较低,多年来曾多次发生屋顶塌陷,房屋多处墙体裂缝明显,基础为天然地基浅基础,整体性差,对外界影响较为敏感,累计沉降报警值为20 mm,沉降速率报警值为连续3 d 沉降速率>2 mm/d。

(2) 在保护建筑北侧、西侧外拟建面积为 13 400 m<sup>2</sup>、深度达 22 m 的基坑, 基坑最外围三轴水泥土搅拌桩止水帷幕距离房屋外墙仅 8 m; 基坑围护结构施工期间对房屋基础产生了扰动, 监测点累计最大沉降量达到 4.6 mm; 后续施工将导致房屋继续沉降、墙体裂缝持续发展。

(3) 由于基坑开挖较深且邻近保护建筑, 基坑在后续地下结构施工、土方开挖、支撑拆除、换撑等过程中, 地下连续墙发生水平位移将会影响房屋的整体稳定性。

考虑到以上因素, 为了保障该建筑的正常开放及安全使用, 减小基坑施工对房屋基础的扰动, 避免发生过大沉降, 必须采取措施对房屋进行保护。

## 2.2 基础加固处理原则

采用改性聚酯注浆技术对房屋外墙基础进行基础加固, 提高房屋基础抵抗变形能力。加固原则如下:

(1) 做好监测工作, 在施工前做好保护建筑地基基础的现状进行调查和房屋检测、监测工作。

(2) 基础加固分为预加固和跟踪注浆加固两个阶段。在基坑围护和地下结构施工期间, 进行预加固注浆; 预加固施工结束后, 结合房屋及基坑监测情况, 当保护建筑连续 3 d 沉降速率 > 1 mm/d 或累计最大沉降量 > 10 mm 时, 进行改性聚酯跟踪注浆。

(3) 在以下施工阶段: a) 围护及地下结构施工阶段; b) 土方开挖阶段; c) 临时支撑拆除、换撑阶段, 着重关注保护建筑沉降情况, 监测频率并及时启动改性聚酯跟踪注浆加固。

## 2.3 基础加固施工方案设计

根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)、《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)等国家行业标准以及工程项目相关资料, 结合 2.2 节的处理原则, 加固设计方案如下:

在基坑围护结构和地下结构施工期间, 进行基础预加固注浆。当保护建筑及基坑监测数据达到加固施工启动值, 启动跟踪注浆加固。保护建筑外墙基础总加固面积 318 m<sup>2</sup>。

预加固注浆施工分为浅层孔注浆和深层孔注浆。其中, 浅层注浆适用于保护建筑已发生沉降, 需要进行基础加固和沉降控制; 深层注浆在建构筑物变形增速较大或邻近基坑即将进行下一道扰动较大的工序前实施, 对已产生较大变形或薄弱的天然地基进行加固, 减缓变形速率。浅层注浆加固深度一般为自然地面下 0~3 m, 深层注浆加固深度一般穿透表层土。

结合勘察资料, 本项目深层注浆加固深度为基础下 0~6 m, 孔间距 1.5 m。因深度较深, 单处共布置 3 个相邻的孔: (1) 0~1 m 深度设置 1 个注浆孔, 插入注浆管长 1.2 m, 孔中心距墙边界线 0.5 m; (2) 1~3 m 深度设置 1 个注浆孔, 插入注浆管分别长 2 m、3 m, 孔中心距墙边界线 0.5 m;

(3) 3~6 m 深度设置 1 个注浆孔, 插入注浆管分别长 4 m、5 m、6 m, 孔中心距墙边界线 0.3 m。各注浆孔垂直墙体方向可错开约 5 cm。

浅层注浆孔间隔布置于深层注浆孔之间, 加固深度为基础下 0~3 m, 孔间距为 1.5 m。单处共布置 2 个相邻的孔: (1) 0~1 m 深度设置 1 个注浆孔, 插入注浆管长 1.2 m, 孔中心距墙边界线 0.5 m;

(2) 1~3 m 深度设置 1 个注浆孔, 插入注浆管分别长 2 m、3 m, 孔中心距墙边界线 0.5 m。各注浆孔垂直墙体方向可错开约 5 cm。

跟踪注浆在浅层注浆孔之间进行注浆加固, 注浆孔间距为 1.5 m, 单个注浆孔分别在基础以下 1 m、2 m、3 m 处分 3 次进行注浆加固。该阶段的施工根据现场监测情况单独实施, 不进行预成孔。加固剖面示意图见图 3。

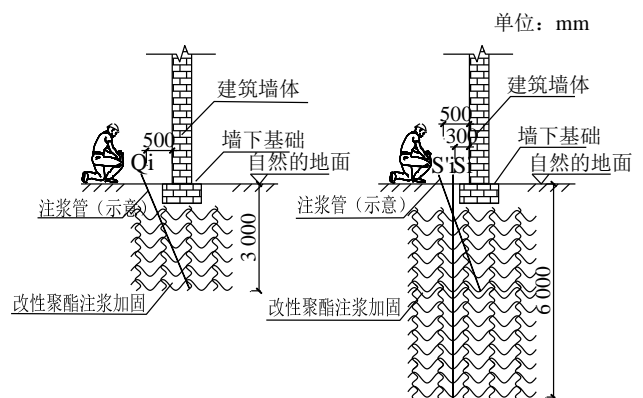


图 3 加固剖面示意图

Fig. 3 Section view of reinforcement

## 3 施工工艺及关键技术

### 3.1 改性聚酯材料技术要求

改性聚酯注浆技术通过将双组份高分子化学材料 A 料(主要成份为聚醚多元醇、扩链剂、催化剂、发泡剂)与 B 料(异氰酸酯预聚体)按照 1:1 体积比例混合, 利用材料黏度低所具有的流动特性, 渗透流入基础周边松散土体空隙内。利用材料混合后 5~60 s 内反应发泡的膨胀特性, 实现对土体的空隙填充、挤密加固。采用专用的地基加固双组份改性聚酯注浆材料, 其技术要求如下:

(1) 浆液黏度小,能迅速扩散到地基中的细小缝隙里,使孔隙填充饱满。

(2) 闭孔率不小于 85%, 断裂伸长率 (1 d) 不小于 2%。

(3) 对水不敏感,遇水仍能保持较高密度和抗压强度,材料自由发泡反应后形成的材料密度应在  $50\sim 200\text{ kg/m}^3$ ,抗压强度应大于  $1\text{ MPa}$  ( $200\text{ kg/m}^3$ )。

(4) 初始反应时间  $4\sim 20\text{ s}$ , 表面干燥时间  $15\sim 50\text{ s}$ ,  $15\text{ min}$  内形成最终强度的 90%以上。

(5) 材料的耐久性能好,在 pH 值分别为 2 和 14 的酸碱溶液中浸泡 30 d、冻融循环 300 次后,抗压强度保持率均大于 70%。

### 3.2 施工工艺总体流程

根据分阶段施工的原则,在地下连续墙施工期间实施了预加固深层/浅层主动加固注浆,后续跟踪注浆根据现场基坑和建筑的监测情况反馈及时实施。施工工艺的总体流程见图 4。

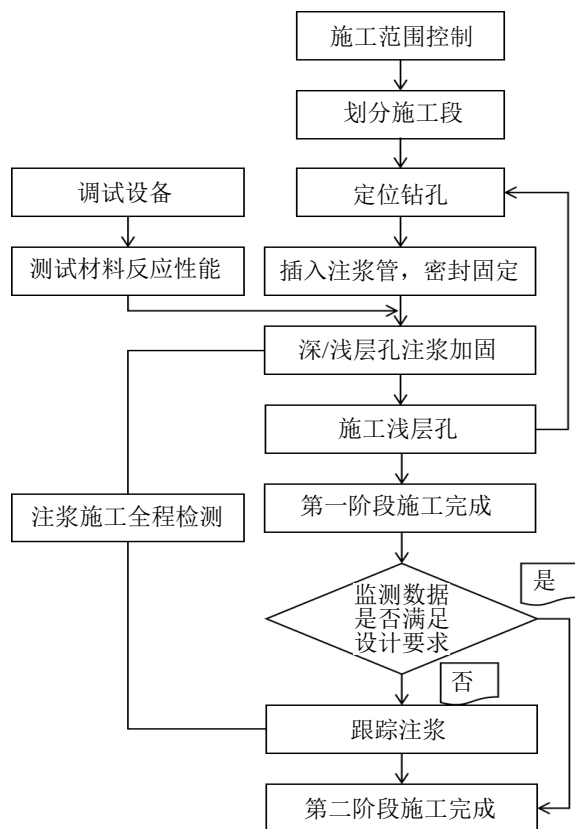


图 4 改性聚酯注浆施工流程图

Fig. 4 Construction process of polyurethane grouting

### 3.3 改性聚酯注浆参数试验

改性聚酯注浆加固工程中,浆液扩散半径与注浆量是重要的设计施工参数,需通过现场试验确定。

传统既有建筑加固采用渗透注浆工艺,其浆液扩散半径根据式(1)的渗透注浆理论公式计算,可得<sup>[11]</sup>:

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{3kh_1r_0t}{\beta n}} \quad (1)$$

式中:  $r_1$  为浆液扩散半径, cm;  $k$  为土体渗透系数,  $\text{cm s}$ ;  $h_1$  为注浆压力水头, cm;  $r_0$  为注浆管半径, cm;  $t$  为注浆时间, min;  $\beta$  为浆液与水的黏度比, 范围取值一般为  $0.1\sim 0.3$ ;  $n$  为土层孔隙率, %。

改性聚酯注浆技术由高聚物注浆技术发展而来,相关试验研究与工程应用发现,此类高分子化学注浆材料扩散加固机理较为复杂,在土体中的扩散兼具渗透扩散与劈裂扩散的特性<sup>[12-13]</sup>,目前尚无标准的扩散半径计算公式。与水泥注浆浆液扩散半径影响因素不同(土体渗透系数、注浆压力等),其反应后材料扩散范围由注浆量和土体密度决定,随着土体密度的增大而减小,随着注浆量的增多而增大<sup>[13]</sup>。

本项目总注浆量计算采用土体总加固体积乘以注浆量经验系数(加固范围每方土注浆量)的方法,结合现场注浆试验确定:目标加固深度  $6\text{ m}$ ,加固面积  $318\text{ m}^2$ ,注浆量经验系数为  $7\text{ kg/m}^3$ ,故总注浆量为  $13\,356\text{ kg}$ 。

### 3.4 施工技术控制要点

为减少注浆施工对保护建筑基础的扰动,防止基础抬升过大,保证施工高效高质量的完成,对施工参数、施工监测的关键技术要点进行了严格把控:

(1) 施工监测:注浆施工阶段监测的主要任务是监测基础上抬情况,并及时将其反馈给注浆操作者以控制注浆节奏。使用精度  $0.5\text{ mm}$  的旋转激光水平仪进行监测(3个接收器以上),将主机设置在注浆影响范围之外,1个接收器设置在注浆点位周围,其余沿墙体走向,布置于邻近注浆点位置。电子水准仪用以辅助监测,复核数据。注浆点完成注浆  $2\text{ min}$  后可撤销对该点的监测。

(2) 注浆压力:注浆过程中压力需保持恒定连续,注浆采用  $1\sim 3\text{ MPa}$  的注浆压力。

(3) 注浆量与扩散半径:通过试验段现场注浆试验确定,每方土注浆量约为  $5.8\sim 7.5\text{ kg/m}^3$ (即每施工延米注浆量约为  $70\sim 90\text{ kg}$ ),根据不同地点具体情况浮动。

(4) 施工顺序:注浆顺序为先施工深层孔,待所有深层孔注浆结束后,再在深层孔之间钻浅层孔并注浆。每处注浆管注浆顺序由短管至长管,施工从靠近基坑且累计沉降最大的北侧开始,顺序为保护建筑北侧-西侧-东侧。

(5) 停浆控制: a) 当前注浆监测点变化量大于 2 mm, 或非注浆影响区域监测点累计变化量超过 10 mm; b) 需增大设备的注浆压力才能保持恒定出浆速率; c) 注浆量达到设计值。现场注浆施工时, 以上任意一个条件满足时, 即可停止当前孔注浆, 并换孔注浆。

### 4 加固实施效果

本次改性聚酯注浆加固施工前后分别进行了轻型动力触探检测, 同时结合施工中的监测和房屋监测数据, 评价基础加固的效果。

#### (1) 轻型动探检测评估

为检验注浆加固的效果及有效加固范围, 分别于注浆施工前后进行了轻型动力触探点位的检测。检测结果如下:

a) 所有检测点数据均显示, 施工后浅层注浆(0~3 m)和深层注浆(3~6 m)动探击数均有所提高, 尤其是在 1.5 m 深度以下, 动探击数提升 1.5~2.0 倍, 预示着与未注浆相比, 土体孔隙被注浆材料填充, 地基土压密, 地基抗变形能力有所提高。注浆前后部分检测点的轻型动探 *N-H* 曲线如图 5 所示。

b) 距离加固范围边缘注浆点 2 m 的检测点(Q5 与 H5)动探击数也显著提高, 平均提高约 50%, 证明改性聚酯注浆的有效加固半径为 2 m, 竖向加固深度 6 m。

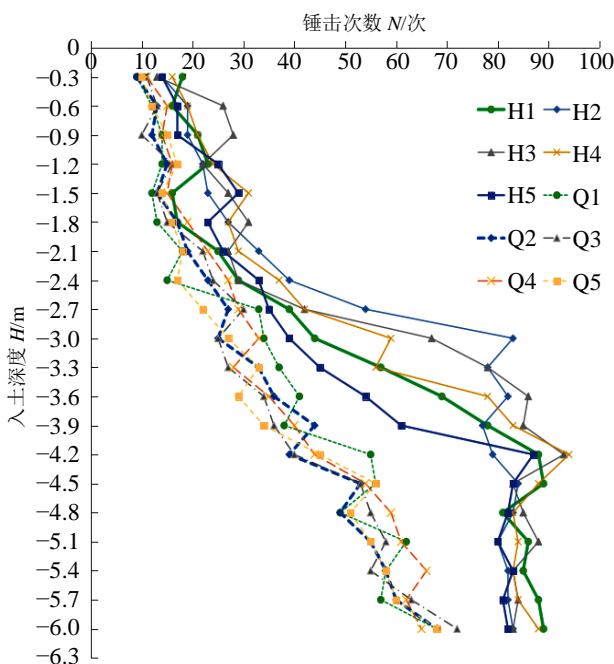


图 5 注浆前后轻型动力触探对比  
Fig. 5 *N-H* curves before and after grouting

#### (2) 监测数据评估

2019 年 10 月 15 日—2020 年 3 月 15 日监测资料显示, 监测点沉降量及裂缝变形量在设计及规范值允许范围内。2020 年 1 月 5 日预加固施工完成后, 邻近保护建筑基础的基坑围护结构开始进行施工, 未加固区明显受到基坑施工扰动影响, 沉降监测点累计最大沉降量达 7.3 mm, 部分监测点连续 3 d 沉降速率达 1.95 mm/d, 接近基坑监测报警值。但是由于该保护建筑预加固已经完成, 由图 6 监测数据可知, 在连续墙施工过程中, 房屋最大累计沉降点 JZ28 (点位见图 1, 距离基坑最近) 的变形量趋于稳定 (竖向沉降 4.9 mm, 水平沉降 1.5 mm)。最大裂缝监测点 LX7 (点位见图 1) 变形量趋于稳定 (长度 1.2 mm, 宽度 0.4 mm)。

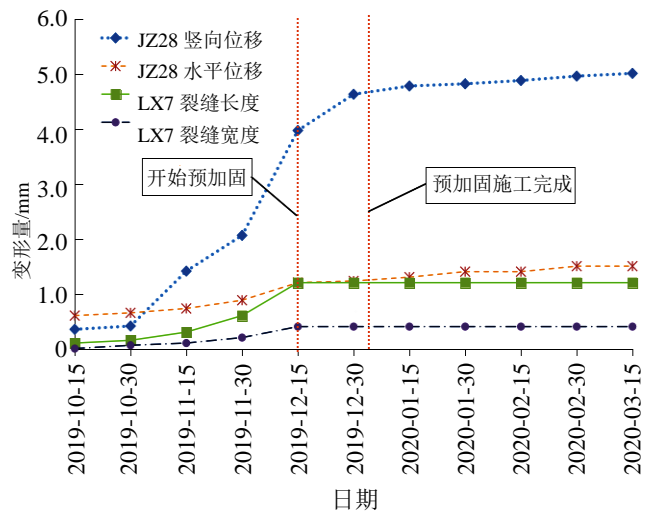


图 6 房屋裂缝及沉降观测点变形监测数据  
Fig. 6 Deformation curves of maximum crack and settlement

### 5 结论与建议

本文介绍了改性聚酯注浆技术对邻近基坑保护建筑基础进行加固的工程应用, 项目实施后成功减轻了基坑施工对基础沉降的影响, 初步结论与建议如下:

(1) 在软土地区采用改性聚酯注浆技术对天然地基浅基础保护建筑进行基础加固, 能有效提高地基承载力, 减小因邻近基坑施工引起的建筑地基沉降。该技术施工快速简便, 对基础的扰动小。

(2) 注浆后改性聚酯材料快速反应, 并在地基中快速充填、扩散、劈裂、胶结, 填充了土体中的空隙与部分裂缝, 竖向加固深度为 6 m 时, 其有效加固半径为 2 m。

(3) 目前注浆加固的预加固阶段已实施完成, 该阶段的注浆对基础下空隙进行填充, 加固地基土,

增强地基土强度并控制沉降, 有效减少邻近基坑地下连续墙施工中对房屋造成的的扰动, 实施效果较好。但因基坑深度较大, 施工周期长, 后续基坑开挖和支撑拆除, 仍然可能对保护建筑基础造成较大的扰动, 如基坑后续施工过程中保护建筑沉降监测值超过报警值, 需及时启动跟踪注浆, 进行沉降补偿注浆。

## 参考文献

- [1] 刘征. 邻近历史保护建筑的深基坑设计与施工[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 233-239.  
LIU Zheng. Design and construction of deep excavation adjacent to conserved historical building[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2): 233-239.
- [2] 徐全庆, 李亚, 徐昀. 跟踪注浆对基坑周围土体变形的控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 126-130.  
XU Quan-qing, LI Ya, XU Yun. Tracing compensation grouting to control ground movement due to excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 126-130.
- [3] 邵国波, 裴红涛, 张建波. 主动区加固控制邻近基坑桩基础变形分析[J]. 公路, 2010(8): 108-112.  
SHAO Guo-bo, CHANG Hong-tao, ZHANG Jian-bo. Influence analysis of active zone reinforcement on pile foundation adjacent to excavation[J]. Highway, 2010(8): 108-112.
- [4] 张文超, 薛炜, 于方. 主动区土体加固对深基坑的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊 1): 211-216.  
ZHANG Wen-chao, XUE Wei, YU Fang. Effect of active zone soil treatment on deep excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 211-216.
- [5] 苏志鹏, 梁永辉. 改性聚酯注浆新技术在松散回填土地基加固中的运用[C]//第二届施工技术论坛. 郑州, 2018: 67-75.  
SU Zhi-peng, LIANG Yong-hui. Application of modified polyurethane grouting new technology in loose backfill foundation reinforcement[C]//The Second Construction Technology Innovation Forum. Zhengzhou, 2018: 67-75.
- [6] 杨玺, 苏志鹏. 高速铁路无砟轨道结构注浆抬升技术的应用[J]. 铁道建筑, 2021, 61(11): 105-108.  
YANG Xi, SU Zhi-peng. Application of grouting uplift technology for ballastless track structure of high speed railway[J]. Railway Engineering, 2021, 61(11): 105-108.
- [7] 苏志鹏, 梁永辉. 改性聚酯注浆新技术在高速铁路基翻浆病害整治中的运用[C]//第十三届全国土力学及岩土工程学术大会. 天津, 2019.  
SU Zhi-peng, LIANG Yong-hui. Application of modified polyurethane grouting new technology in remediation of high speed railway Subgrade mud pumping disease[C]//The 13th National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Tianjin, 2019.
- [8] ERDEMGIL M, SALAM S, BAKR S. Utilization of highly expansive polymer injection to mitigate seismic foundation for existing structures[C]//8th Pacific Conference on Earthquake Engineering. Singapore, 2007.
- [9] SHUCAI L, CHENYANG M, RENTAI L, et al. Super-absorbent swellable polymer as grouting material for treatment of karst water inrush[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(5): 753-763.
- [10] 苏志鹏, 梁永辉. 改性聚酯注浆新技术在控制基坑周边房屋沉降的运用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 2): 109-112.  
SU Zhi-peng, LIANG Yong-hui. Application of PU grouting in settlements of structures induced by excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 109-112.
- [11] 姜尊义. 既有建筑地基注浆加固施工工艺[J]. 中国新技术新品, 2021, 22(11): 103-105.  
JIANG Zun-yi. Construction technology of grouting reinforcement of existing building foundation[J]. New Technologies and Products in China, 2021, 22(11): 103-105.
- [12] 卢伟敏. 堤坝防渗加固高聚物注浆材料的扩散性状实验研究[J]. 黑龙江水利科技, 2019, 47(11): 20-22, 184.  
LU Wei-min. Experimental study on diffusion behavior of eupolymer grouting material reinforced by levee seepage prevention[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2019, 47(11): 20-22, 184.
- [13] 石明生, 杨淑琪, 王利超, 等. 自膨胀高聚物在土体中扩散机理研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(9): 156-159, 164.  
SHI Ming-sheng, YANG Shu-qi, WANG Li-chao, et al. Study on diffusion mechanism of polymer grouting materials in soil[J]. Yellow River, 2021, 43(9): 156-159, 164.