

软弱地层临近深基坑工程房屋沉降注浆控制研究

李浩^{1,2}, 贺祖浩^{1,2}, 杨钊^{1,3}, 石福龙¹, 马超^{1,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室;
3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心)

摘要:在临近建筑物深基坑开挖过程中,由于施工控制和地质原因经常会使建筑物出现较大的沉降,严重时会造成房屋开裂和基坑坍塌,而跟踪注浆是控制房屋沉降的有效措施之一。该文依托某临近建筑物深基坑工程,通过现场监测和 Abaqus 数值模拟分析注浆对建筑物的影响。结果表明:① 软弱松散地层注浆实现房屋抬升分为前期注浆加固和后期注浆抬升两个过程,前期注浆扰动土体会造成房屋沉降;② 止浆墙可有效控制浆液扩散范围,减小浆液流失,是实现房屋抬升的必要措施;③ 软弱地层临近深基坑建筑物注浆抬升是一个挑战性的工程,前期注浆需低压并少量多次,尽量减小地层扰动,土层有一定强度之后,再高压注浆,可实现房屋止沉抬升。

关键词:软弱地质;深基坑;紧邻建筑物;注浆抬升;注浆控制

随着城市建设的快速发展,越来越多的深基坑工程向城市密集区集中,施工紧邻建筑物的工程越来越多。基坑开挖引起地层和应力损失不可避免地对周边建筑物造成影响。而在一些老城区,地基基础多为筏板基础或管桩基础,建筑物一旦发生不均匀沉降很容易造成房屋的开裂变形,产生较大的经济损失和安全隐患。而注浆一方面可以改善地层,提高地基承载力;另一方面又可以对周边地层进行挤密,补偿地层损失。所以利用注浆去实现房屋的止沉抬升,已经成为设计或施工单位采取的优选措施之一。在实际注浆过程中,由于注浆方法或参数控制不当,经常达不到预期效果,施工监测发现,注浆后的一段时间,建筑物经常出现沉降速率加快的现象。所以研究注浆过程控制就成为具有实用价值的问题。许多专家学者在注浆的原理和施工控制方面进行了很多有益的探索。许建瑞以深圳大铲湾港口区集装箱码头一期工程办公楼双液浆加固纠偏工程为依托,指出单次注浆速率过快会引起办公楼沉降速率加快,多次注浆效果更佳;易小明等以厦门机场路的房屋注浆抬升工程为依托,通过现场监测和理论分析,提出补偿注浆能够较好地实现房屋止沉,而房屋的抬升则极富挑战性;张伟杰等通过模型试验模拟在黏土介质注浆,提出运用较小注浆速率结合多孔注浆方法,可有效减小围岩扰动;候艳娟等以厦门市成功大道工程为依托,研究了注浆机理,将建筑物注

浆抬升分为初始填充密实、浆土固结、土体压密、劈裂抬升4个阶段;张俊等通过在高速路基下方注浆加固试验,提出对软土路基下方有选择地进行分层注浆的加固效果优于全地层注浆效果;唐智伟通过研究注浆引起的土体体积膨胀机制,将注浆体积、土体体积应变增量、位移大小三者联系在一起,提出有限元计算中施加“虚拟”膨胀压力来增加单元体积的方法。然而,对临近深基坑施工建筑物跟踪注浆控制还比较少。

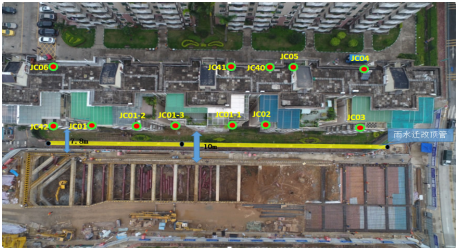
该文依托深圳某地铁站临近建筑物的深基坑工程,对施工过程中周边建筑物的跟踪注浆进行现场监测和有限元分析,总结跟踪注浆控制措施和注意要点,可为类似工程提供借鉴和参考。

1 工程概况

深圳某地铁站基坑全长268 m,基坑宽度20.1 m,基坑深约18.5 m(局部约20.1 m)。基坑周边建筑物密集(图1)。房屋始建于20世纪90年代初,基础为筏板基础,离基坑最近3.5 m。

依据地质资料,地层主要由3部分组成:地表一般分布有第四系全新统人工堆填层、全新统冲洪积层、坡积层、残积层、下伏主要为侏罗系凝灰岩和石炭系测水组上段石英砂岩和泥质页岩,下段粉砂岩及二云母片岩岩脉和构造岩破碎带,地下水位埋深2~3 m。地下

水赋存于第四纪松散地层孔隙中,含水层厚度为10~30 m。



(a) 基坑平面图



(b) 房屋情况

图1 基坑与建筑物位置关系

2 开挖前预注浆

为保证基坑开挖期间周边建构筑物安全,在开挖前对周边房屋进行袖阀管预加固。根据现场管线及场地等采取斜向、竖向两种方式向建筑物基础下方施打袖阀管,袖阀管间距为1.5 m,梅花形布置,加固区域和袖阀管布置如图2、3所示。

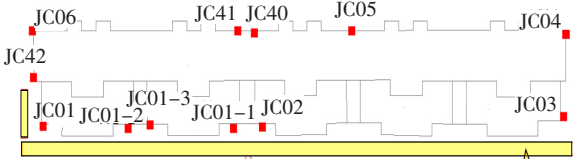


图2 房屋加固区及监测点布置示意图

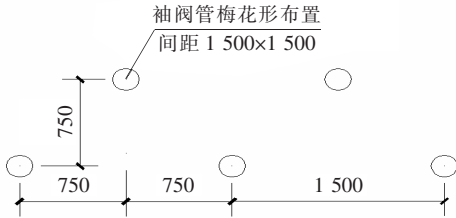


图3 注浆平面示意图(单位:mm)

采用水泥浆液和水泥—水玻璃双液浆交替注浆,水泥浆浆液配比为:水:水泥=0.6:1,水泥浆:水玻璃=1:1,玻美度为20~25 Be',双浆液凝结时间不

超过1 min。注浆时,从孔底向上每0.6 m长为一竖向注浆分段。当注浆压力 ≥ 1.0 MPa,吸浆量 < 2.5 L/min,继续注浆25 min,或者当窜浆或浆液漏失现象严重,建筑物上抬超过2 mm,即可终止注浆。

3 房屋注浆机理及数值分析

3.1 房屋注浆抬升机理

浆液在地层中的作用有3种方式:渗透、填充、劈裂和压密。注浆抬升主要以压密和劈裂注浆为主,劈裂注浆和渗透注浆的最大区别就是,劈裂注浆会破坏注浆对象的原始结构。浆液的劈裂面发生在主应力最小的面,在某一深度地层中的应力为:

$$\sigma_v = q + \gamma h$$

$$\sigma_h = k_0 \sigma_v$$

式中: γ 为土层重度; h 为应力点深度; q 为附加荷载; k_0 为静止土压力系数,一般 $k_0 = 1 - \sin \varphi$, φ 为土体内摩擦角。

所以浆液在地层中的劈裂路线呈纵横交叉的脉状网络,劈裂注浆在土体固结形态多呈扁平球体或板状固结,如图4所示。

补偿注浆以填充挤密为主,抬升注浆以劈裂为主。注浆过程:填充压密—劈裂一再填充压密、再劈裂,直到最终注浆量、注浆压力都达到设计值,则地层被加固密实。主要起到地层改良和地层损失补偿的作用。其示意图见图4、5。

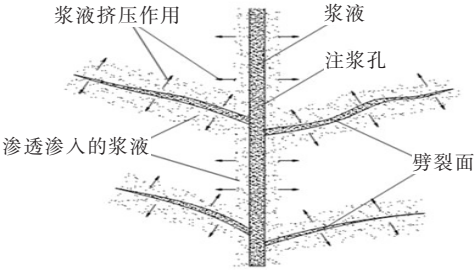


图4 劈裂注浆原理图

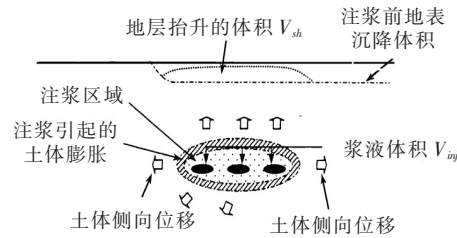


图5 注浆抬升地表示意图

根据工程经验,土体体积的膨胀将引起地表的抬

升,地层抬升的体积与注浆体积成正比:

$$\xi = V_{sh} / V_{inj} \tag{3}$$

式中: ξ 为注浆补偿率; V_{sh} 为地层抬升的体积; V_{inj} 为注浆液体积。 ξ 的值一般为 5%~20%。

数值方法模拟注浆效果通常是通过提高注浆区域的土性参数来实现,但该方法忽略了注浆抬升对地层的补偿作用。采用数值方法对注浆地层抬升进行模拟,主要有两种方法:① 直接对注浆单元施加体积应变;② 通过施加膨胀压力让注浆单元体积产生膨胀。根据唐智伟等的研究结果,施加膨胀压力的方法更接近实际情况。后续数值计算主要采用施加膨胀压力的方法实现。

3.2 计算模型及参数取值

利用 Abaqus 对基坑开挖前与开挖过程注浆引起的房屋沉降变化进行数值分析,计算根据实际情况在房屋底部 8 m 的位置进行注浆。注浆半径按 0.7 m 考虑,模拟止浆墙和注浆压力对房屋沉降的影响,在注浆区域施加膨胀压力,为尽可能保证模型收敛,压力分次施加。计算模型如图 6 所示。

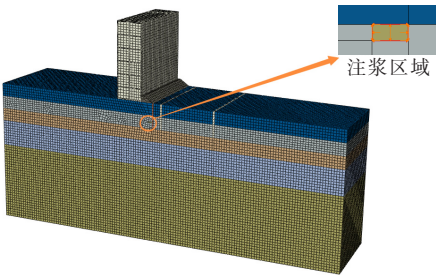


图 6 有限元计算模型

地层参数根据地勘资料进行取值,见表 1。

表 1 地层参数取值

土层	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa
素填土	18.5	8.0	12.0	12.5
淤泥质粉质黏土	18.2	5.6	6.1	8.2
粉质黏土	18.7	15.0	16.0	18.0
强风地层	19.0	25.0	22.0	28.0
加固后层	20.0	100.0	25.0	30.0

3.3 计算结果分析

(1) 止浆墙对房屋沉降控制模拟

分别对原始地层、有止浆墙地层、有止浆墙地层硬化后基坑不同开挖深度的注浆进行数值模拟。计算结果为提取垂直基坑方向路径的沉降,具体见图 7。

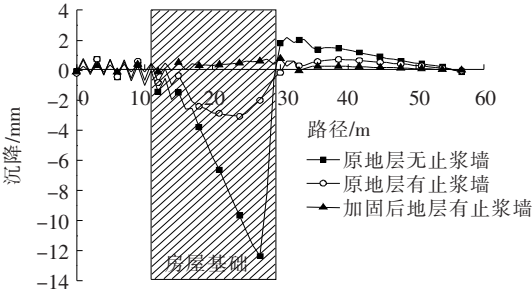


图 7 3 种工况下房屋及周边地层沉降曲线

由图 7 可知:① 无止浆墙原始地层注浆在 0.5 MPa 注浆压力下,房屋沉降 11.7 mm,这是由于在注浆压力作用下,土体由房屋一侧挤出,导致房屋沉降加剧;有止浆墙情况下注浆,土体沿房屋一侧的挤出变形明显减小,但由于地层无法提供足够的支反力,注浆同样无法达到较好的效果,房屋沉降 3 mm;在加固地层力学参数有明显改善的情况下,地层有足够的支反力,注浆可以实现房屋的抬升,在 0.5 MPa 的注浆压力下房屋抬升 0.65 mm;② 基础变形主要以倾斜为主,筏板基础有助于提高建筑物的整体承载力和适应不均匀沉降能力。

(2) 开挖阶段房屋沉降控制模拟

为研究基坑开挖过程中跟踪注浆对房屋沉降影响及地连墙变形情况,分别计算开挖每一层注浆前和注浆后位移变化的差值,从而分析每个施工阶段注浆对房屋及围护结构的影响。计算结果提取房屋注浆加固后开挖到每一层注浆前后房屋至基坑边缘沉降的变化情况,具体如图 8~13 所示。

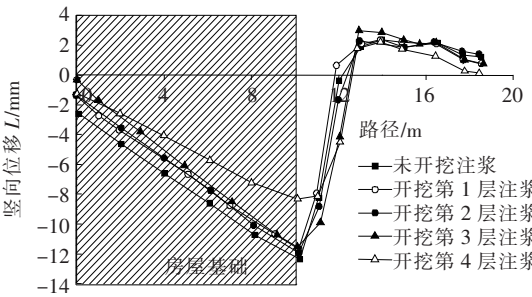


图 8 未加固注浆竖向位移变化曲线

由图 8、9 可以看出:随着开挖的进行,注浆引起房屋出现较大的沉降,地连墙出现最大 7 mm 的水平位移。但随着开挖的继续进行,其差异性越来越不明显。

由图 10、11 可以看出:有止浆墙注浆引起的房屋沉降明显要小于没有止浆墙地层,最大沉降 3.3 mm。地连墙最大水平位移 3 mm,同样随着基坑的开挖,其变化量并不明显。

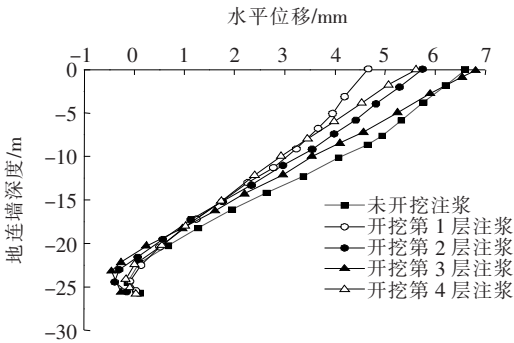


图9 未加固注浆地连墙水平位移变化曲线

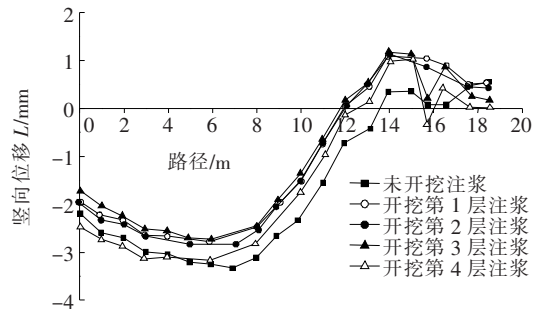


图10 有止浆墙注浆竖向位移变化曲线

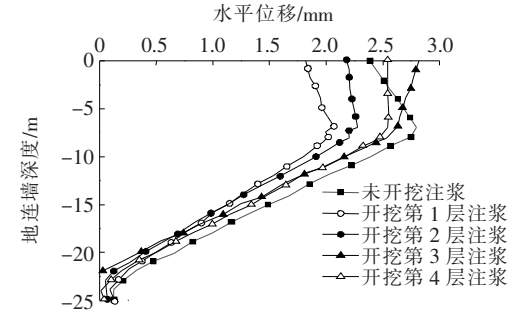


图11 有止浆墙注浆地连墙水平位移变化曲线

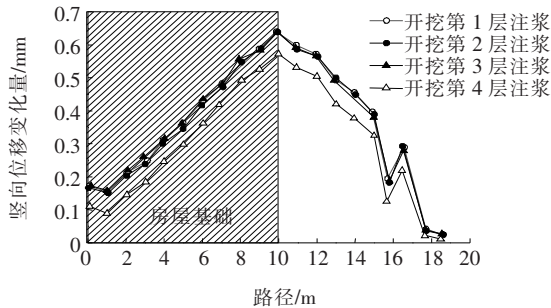


图12 加固后注浆竖向位移变化曲线

由图12、13可以看到:加固后注浆可以实现房屋的抬升,最大抬升0.65 mm。地连墙在注浆深度位置有局部水平位移1.7 mm。

综上分析说明:开挖过程注意及时架设支撑,避免超挖,做好地连墙位移监测,控制注浆压力,跟踪注浆和施工前注浆对房屋沉降的差异差别很小。

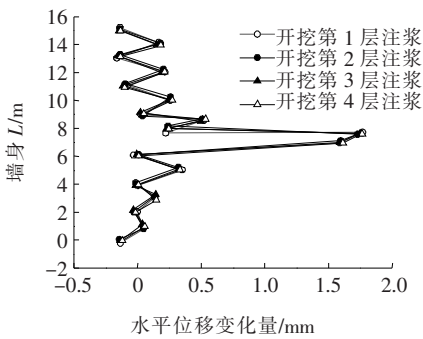


图13 加固后注浆地连墙水平位移变化曲线

(3) 注浆压力对建筑物沉降影响

为分析土层各阶段注浆压力的变化对地层的影响,对3种工况,注浆压力分别取0.3、0.5、0.8、1.0、1.5 MPa时房屋竖向位移结果进行分析,结果如图14所示。

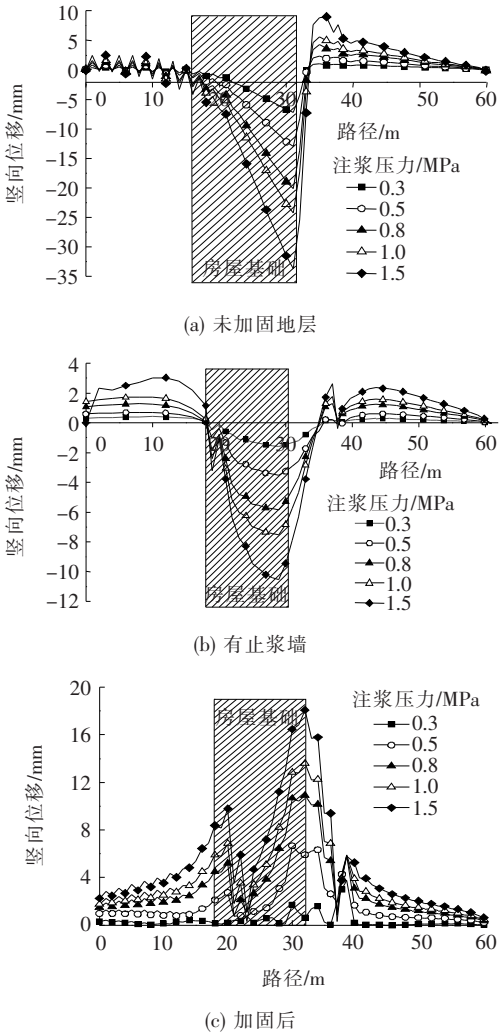


图14 不同地层条件下注浆压力与房屋竖向位移变化曲线

由图14可以看出:在地层未加固的情况下,随着注浆压力的增加,房屋的沉降变大。在地层加固完成

后,注浆压力的增大房屋抬升效果越明显。所以在前期注浆要少量多次,低压慢注,地层逐渐改善后再增大注浆压力和注浆量,达到房屋抬升的目的。

4 现场监测及跟踪注浆控制

为对房屋沉降进行更好的控制,后期土方开挖过程中,采取跟踪注浆措施。在注浆过程中对房屋沉降量和沉降速率进行监测,现场监测结果如图 15、16 所示。

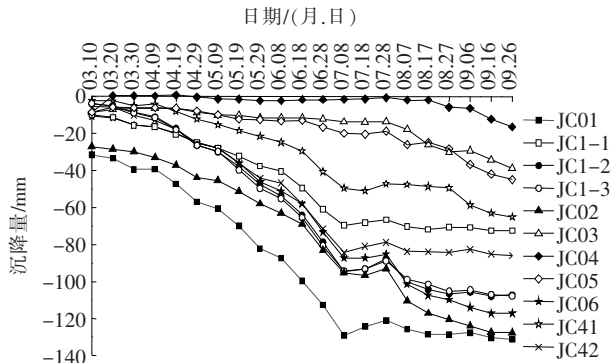


图 15 监测点施工工序与沉降曲线(2017 年)

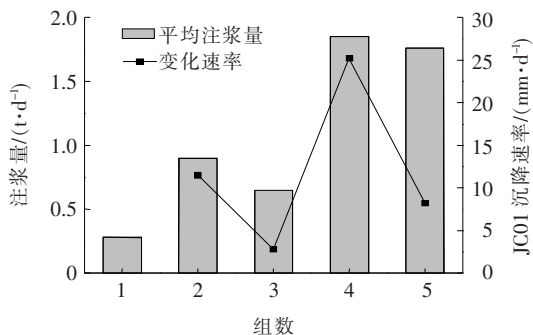


图 16 沉降速率与注浆速率关系(JC01 测点)

由图 15、16 可以看出:① 前期开挖注浆过程中房屋沉降明显,后期沉降曲线趋于稳定;② 注浆量与沉降速率正相关。注浆速率过快,会引起房屋沉降加剧,说明软弱地层注浆会引起地层孔隙水压力的上升,而孔隙水压力消散过程是土层固结沉降的过程,注浆速率过快造成更大范围内的地层扰动,从而引起房屋沉降。

由于开挖过程中房屋沉降继续发展,为尽量减小地层扰动,实现对房屋沉降的有效控制,注浆采取少量多次、单双液浆交替进行注浆,并控制注浆压力 <1 MPa。至 2017 年 7 月 11 号,此时注浆量为 350 t 左右时房屋实现了注浆抬升,与数值计算结果吻合。

由于淤泥和黏土地层注浆会使浆液过于扩散不够集中,在这样一个松散基础环境中,地基承载力低,注

浆地基无法提供足够的支反力,实现房屋抬升是非常困难的。随着注浆的持续进行,土层的力学性能得到逐步改善,土层被固结挤密,注浆后引起的地层固结沉降越来越小。地层有了明显的改善,此时进行跟踪补偿注浆,地基可以提供足够的支反力,注浆可以实现房屋抬升。

5 结论及建议

(1) 在临近房屋深基坑开挖过程中,容易引起临近房屋差异沉降,需注重对房屋采取止沉措施。

(2) 在地层松散孔隙率大的基础环境中,实现房屋抬升前期有可能造成房屋加速沉降。注浆前要做好止浆墙,少量多次注浆,逐渐提高土层的力学性能。

(3) 有止浆墙和地层加固可以减小跟踪注浆过程中的房屋沉降和地连墙的位移。在房屋注浆抬升之前,要重视止浆措施和地层预加固。

(4) 严格意义上的房屋抬升是很有挑战性的一项技术。它的必要前提是:止浆墙和地层的预加固。同时,还需要采取合理的抬升压力。在注浆之前要做好止浆措施,地层加固之前要低压慢注,地层逐渐改善后再提高注浆压力,实现房屋注浆抬升。

参考文献:

- [1] 许建瑞. 双液多次劈裂注浆加固纠偏软土地基的应用[J]. 施工技术, 2017(A1).
- [2] 李继宏, 许燕锋. 跟踪注浆在保护周边建筑物中的应用——广州以太广场建筑物的沉降及控制[J]. 现代隧道技术, 2002(1).
- [3] 邓指军. 双液微扰动加固注浆试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011(A1).
- [4] 郑刚, 张晓双. 软黏土上上覆荷载对注浆抬升长期效果影响的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016(6).
- [5] 张伟杰. 三维注浆模型试验系统研制及应用[J]. 岩土力学, 2016(3).
- [6] 侯艳娟, 张顶立, 陈峰宾. 隧道施工下穿建筑物注浆抬升机制及预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(12).
- [7] 唐智伟, 赵成刚. 注浆抬升地层的机制, 解析解及数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2008(6).
- [8] 李明. 铝粉水泥浆在黄土路基沉陷注浆处治工程中的应用[J]. 中外公路, 2019(3).
- [9] 张学文. 建筑密集区地铁车站深基坑施工关键技术研究[J]. 中外公路, 2018(2).
- [10] 邱伟, 易善昌, 龚维亮, 等. 基于 EPS 的海相深厚软基区路基不均匀沉降处治研究[J]. 中外公路, 2018(4).