

DOI: 10.11779/CJGE201606001

软黏土中上覆荷载对注浆抬升长期效果影响的模型试验研究

郑 刚^{1, 2}, 张晓双^{1, 2}

(1. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要: 利用注浆模型试验装置进行了一系列室内注浆试验, 研究在不同上覆荷载条件下, 软黏土中注浆抬升长期效果的变化规律, 以及注浆间隔时间、土体超固结比和软黏土中加固措施对注浆抬升长期效果的影响。结果表明: 正常固结土的最终补偿注浆率随上覆荷载的增大而减小, 注浆峰值压力随上覆荷载的增大而增大, 且与上覆荷载呈线性关系; 总注浆量相同时, 采用重复注浆方式时, 上覆荷载较小时最终补偿注浆率小于连续注浆时最终补偿注浆率, 上覆荷载较大时则大于连续注浆时最终补偿注浆率; 相同上覆荷载条件下, 重复注浆间隔时间越长, 最终补偿注浆率越小; 对超固结土, 注浆抬升效果较好, 最终补偿注浆率随超固结比的增大而增大, 当上覆荷载大于 75 kPa 或者超固结比增大到 2.0 后, 最终补偿注浆率几乎不随上覆荷载的变化而变化; 对软黏土进行预先加固后再进行抬升注浆, 可显著提高其最终补偿注浆率, 注浆抬升效果明显。

关键词: 上覆荷载; 补偿注浆; 间隔时间; 超固结比; 加固

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)06 - 0969 - 09

作者简介: 郑 刚(1967 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程教学与科研工作。E-mail: zhenggang1967@163.com。

Laboratory model tests on effect of overlying load on long-term effectiveness of grouting uplift in soft clay

ZHENG Gang^{1, 2}, ZHANG Xiao-shuang^{1, 2}

(1. MOE Key Laboratory of Coastal Civil Engineering Structures and Safety, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A series of laboratory grouting tests are performed to study the change rules of the long-term effectiveness of grouting uplift under various overlying loads by using a set of grouting experimental setup. The effects of interval time, overconsolidation ratio and reinforcement measures of soft clay on the long-term efficiency of grouting uplift under various overlying loads are also studied. The results show that the final compensation grouting efficiency of normally consolidated soils decreases with the increase of overlying load. The peak grouting pressure increases linearly with the increase of overlying load. When the total grouting volume is the same and regrouting is conducted, the single injection with large injection volume results in the best final compensation grouting efficiency under small overlying load, whereas the final compensation grouting efficiency of single injection is less than that of regrouting under large overlying load. In addition, the larger the interval time, the lower the final compensation grouting efficiency when the overlying load is the same. For the over-consolidated soil, the efficiency of grouting uplift is significant and the final compensation grouting efficiency increases with the increase of over-consolidation ratio. The final compensation grouting efficiency almost has little change with the increase of the overlying load when the overlying load is larger than 75 kPa or the over-consolidation ratio is equal to 2.0. The reinforcement measures can significantly increase the final compensation grouting efficiency and the effect of grouting uplift is obvious.

Key words: overlying load; compensation grouting; interval time; over-consolidation ratio; reinforcement

0 引 言

基坑、隧道施工会对周围土层产生扰动^[1-3], 当扰动程度较大时, 可导致地层变形过大, 引起邻近建筑物、地下管线、地下隧道结构物等沉降过大、变形超

限, 则必须及时采取措施来控制变形的发展防止进一

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2010CB732106)

收稿日期: 2015 - 03 - 05

步破坏。对于基坑、隧道施工引起的地层、建筑物沉降，所进行的沉降恢复主要通过注浆抬升来实现^[4]。

注浆抬升的基本原理是通过在隧道和建筑物之间土体中注入浆液补偿由于开挖导致的土体损失和应力释放^[5]。目前，注浆抬升技术已经被广泛应用，并通过数值模拟和现场监控数据进行了大量注浆抬升技术的研究^[6-9]。Soga等^[10-11]指出研究软黏土中注浆抬升长期效果的必要性，并通过室内试验研究了注浆材料、边界条件、注浆方式等因素对注浆长期效果的影响。易小明等^[12]通过对现场房屋的抬升实践和监测分析发现地表抬升往往是局部的、不均匀的。

隧道开挖过程中，隧道不可避免地穿越不同高度的建筑物^[13]。天津地铁3号线下穿如图1(a)所示的两幢建筑物时，为保证建筑物结构安全，需要对建筑物下方掘进影响范围内进行注浆加固弥补地层损失（盾构机处于停机保压状态）。相同注浆条件下，某大楼（6层建筑物，JHY8、JHY9）抬升一段时间后发生较大沉降，多次注浆仍无法实现建筑物的抬升，而相邻某商店（单层建筑物，JHY10、JHY11）则在每次注浆抬升后仅发生较小沉降，整体呈隆起趋势，见图1(b)，注浆起到一定的抬升效果。这说明上覆荷载对软黏土中注浆效果影响较大，有必要研究上覆荷载对软黏土中注浆抬升长期效果的影响。

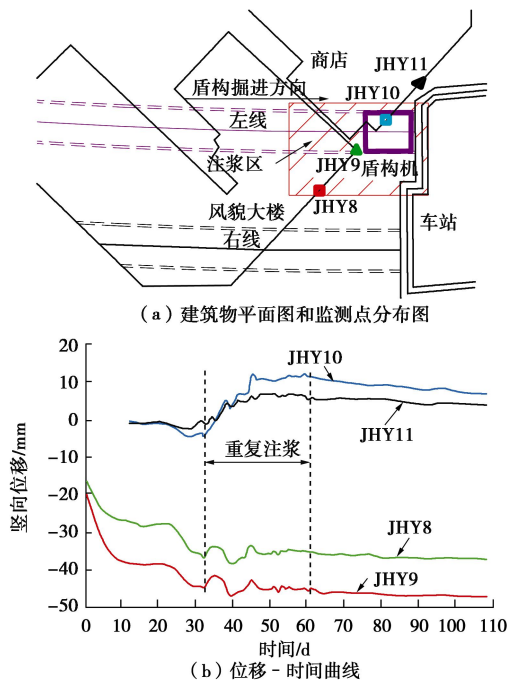


图1 测点分布图和位移-时间曲线

Fig. 1 Layout measuring of points and settlement-time curves

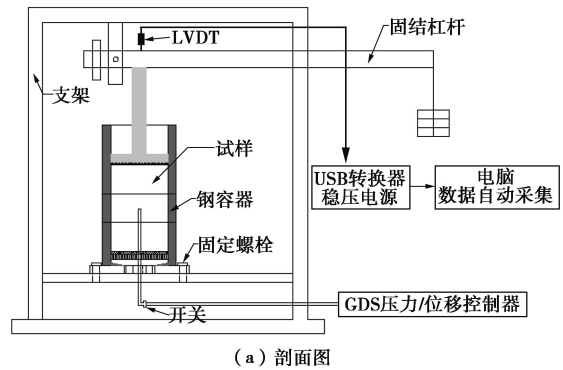
本文通过一系列室内注浆模型试验，研究在不同上覆荷载条件下，正常固结软黏土中注浆抬升长期效果的变化规律，以及注浆间隔时间、土体超固结比和

软黏土中加固措施对注浆抬升长期效果的影响。

1 室内模型试验研究

1.1 试验装备

为了研究上覆荷载对注浆抬升效果的影响，参照Soga等^[10-11]的试验装置，设计加工了一套注浆模型试验装置，如图2所示，该装置包含3部分：固结设备、注浆设备和监测设备。



(a) 剖面图



(b) 实物图

图2 试验装置

Fig. 2 Laboratory experimental setup

(1) 固结设备

固结设备包括钢容器和固结杠杆。试验采用侧限边界条件，固结杠杆比为1:24.686，钢容器壁厚15mm，经计算，在该试验所需压力作用下，钢容器的变形可以忽略。如图3所示，钢容器内径100mm，由3部分组装而成，第1部分总高120mm，土样部分50mm，上部用于初始土样盛放和排水；第2部分总高50mm，土样部分50mm；第3部分总高75mm，土样部分50mm，底部用于排水。这3部分由螺栓连接，螺栓直径10mm，底部与固结杠杆底座固定。

土样上下有滤纸和透水石，上部透水石之上有透水钢板活塞，既可排水，又可灵活上下活动，用于排水和加载，下部透水石之下为透水钢板，固定不动，仅用于排水。底部空腔形成斜面，易于水全部从出水口排出。

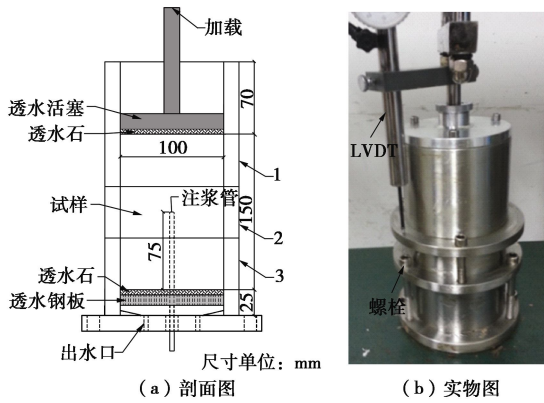


图 3 固结钢容器

Fig. 3 Steel container for consolidation

(2) 注浆设备

注浆设备包括注浆管和 GDS 标准压力/体积控制器。注浆管内径 4 mm, 外径 6 mm, 顶部沿圆周均布 4 个直径为 2 mm 的注浆孔, 见图 4, 总长为 200 mm, 底部透水石之上为 75 mm, 位于土体试样中心。

GDS 标准压力/体积控制器 (STDDPCv2) 是一个通用的水压源和体变测量计, 可以精准的控制压力和体积。GDS 与注浆管连接, 连接处有开关, 防止注浆管中的液体流出。



图 4 注浆设备

Fig. 4 Injecting equipment

(3) 监测设备

采用 LVDT 监测位移变化情况, 连接计算机, 自动采集数据。LVDT 量程为 10 mm, 精度为 0.001 mm。

1.2 试验过程

采用天津粉质黏土 (冲积层③₁粉质黏土), 现场取样, 实验室内将土体烘干后粉碎, 过 0.5 mm 筛, 与蒸馏水以 1 : 0.8 的重度比混合均匀形成土体浆液, 然后置于钢容器中, 通过固结杠杆分级施加加载, 上覆荷载

加荷方案为 10 kPa—15 kPa—25 kPa—50 kPa—75 kPa—100 kPa—200 kPa, 每级荷载固结 6 h, 当达到目标上覆荷载后停止加载并静置, 直至固结完成, 达到稳定状态 (竖向位移变化率小于 0.001 mm/h, 对注浆后的固结沉降的影响可以忽略)。试样物理力学参数见表 1。

注浆抬升过程中浆液在土体中的扩散过程非常复杂, 包含渗透、压密、劈裂等多种方式。由于本文重点研究不同上覆荷载作用下, 注浆抬升后超孔隙水压力消散过程对注浆抬升长期效果的影响, 因此在较为明确的注浆加固机理前提下进行试验, 将注浆过程设计为理想压密注浆, 在注浆管上部固定薄壁气囊, 通过注浆孔把浆液注入气囊, 不考虑压滤和渗透作用^[11, 14-15], 见图 5。通过 GDS 以一定速率压注液体, 达到目标体积后, 关闭开关, 计算机自动采集 LVDT 数据, 监测土样竖向位移变化, 竖向位移变化率小于 0.005 mm/h 时试验结束, 此时, 可认为注浆引起的超孔隙水压力几乎完全消散, 土体固结完成, 以模拟注浆抬升的长期效果。

表 1 试样基本物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

含水率 /%	孔隙比	密度 / (g·cm ⁻³)	压缩模量 / MPa	内摩擦角 / (°)	塑性指数	渗透系数 / (m·s ⁻¹)
45.87	1.261	1.65	1.16	17.22	16.29	1×10 ⁻⁹

注: 内摩擦角通过固结快剪试验获得; 重塑土黏聚力为 0 kPa。

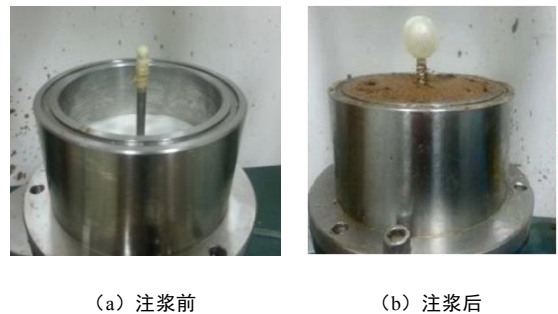


图 5 理想压密注浆

Fig. 5 Ideal compaction grouting

2 试验结果分析

2.1 上覆荷载对连续注浆效果影响分析

补偿注浆率为抬升体积与注浆量的比值^[10]。相同试验参数条件下, 两次重复试验注浆结束后补偿注浆率随时间的变化曲线如图 6 所示。上覆荷载均为 75 kPa, 注浆量为 10 mL, 注浆速率为 500 mm³/s。由图 6 可知, 两次重复试验在固结过程中补偿注浆率最大差值为 2.68%, 最终补偿注浆率仅相差 1.28%, 两者的差异性在合理范围内, 说明该试验具有可重复性,

试验结果可靠, 故以下分析中只给出了其中一个试验的结果。

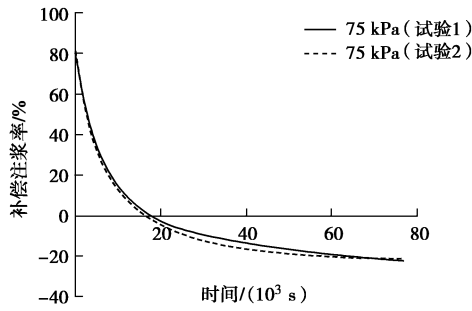


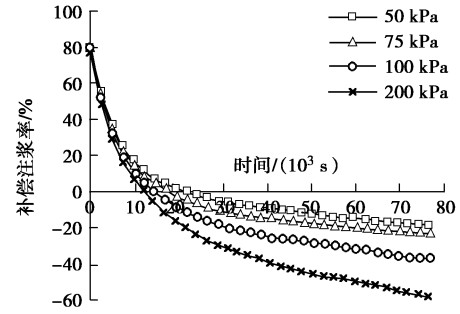
图 6 补偿注浆率 - 时间曲线

Fig. 6 Curves of compensation grouting efficiency versus time

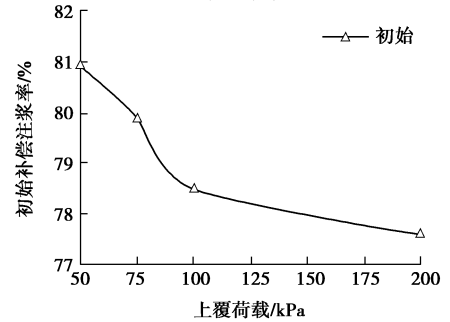
以注浆结束时刻为起点, 上覆荷载对连续注浆效果的影响如图 7 所示。如果假定注浆过程为不排水状态, 则抬升体积应与注浆量相同, 即补偿注浆率为 100%, 而由图 7 (a) 可知, 初始补偿注浆率均小于 100%, 这主要由两方面原因造成的: ①注浆过程为排水过程, 虽然时间短暂, 但不是完全不排水状态; ②浆液、注浆管连接处、土体中存在细小的气泡, 注浆过程中, 气泡压缩, 减小抬升体积。由图 7 (b) 可知, 初始补偿注浆率随上覆荷载的增大而减小, 但均在 77%~81% 范围内, 对整体变化趋势无影响, 且上述两方面原因对注浆结束后的固结过程几乎不再有影响。

相同上覆荷载条件下, 注浆结束后补偿注浆率随时间的发展先急剧减小后趋于稳定; 在不同上覆荷载作用下, 最终补偿注浆率均小于 0, 这主要是因为注浆过程中, 软黏土易于被扰动, 且具有较大压缩性, 注浆结束后土体中的超孔隙水压力消散 (试验过程中已经稳定的土体在注浆结束后又有一定量的水流出) 所产生的沉降位移大于注浆抬升量, 导致最终补偿注浆率小于 0, 如图 7 (c) 所示, 这与正常固结软黏土中现场补偿注浆试验以及室内补偿注浆试验实测数据和发现的规律一致^[10, 16]。随着上覆荷载的增大, 最终补偿注浆率整体上呈减小趋势。

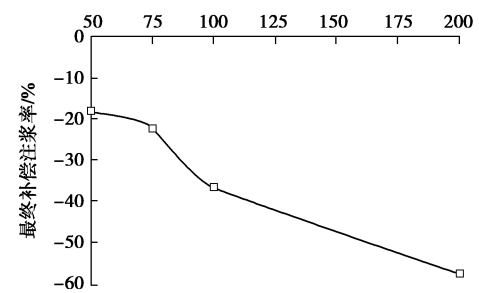
图 8 为上覆荷载不同时竖向位移变化速率的曲线。注浆结束后, 相同上覆荷载时, 前期竖向位移变化速率整体呈线性减小趋势; 后期竖向位移变化速率可用幂函数较好的拟合, 竖向位移变化速率显著降低后逐渐趋于 0。不同上覆荷载条件下, 前期竖向位移变化速率相差不大, 仅在 1500 s 范围内有较大的波动; 后期时, 相同时间内, 上覆荷载越大, 竖向位移变化速率越大, 达到稳定状态所需要的时间越长, 这就导致上覆荷载越大, 发生的沉降量越大, 最终补偿注浆率越小。



(a) 补偿注浆率 - 时间曲线



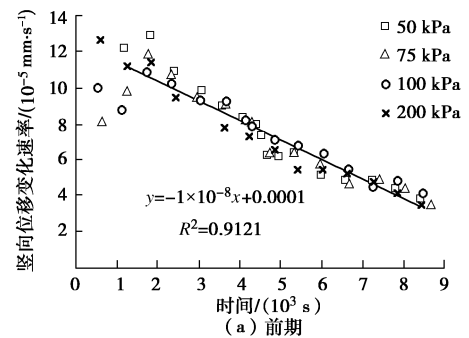
(b) 注浆结束时效果
上覆荷载/kPa



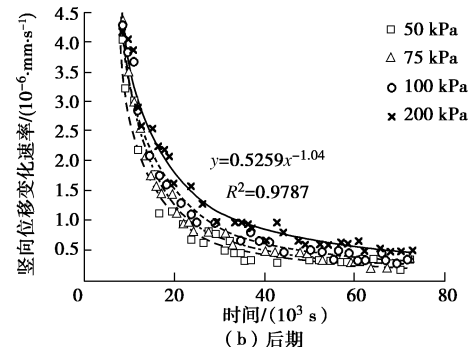
(c) 长期注浆效果

图 7 连续注浆效果变化曲线

Fig. 7 Curves of continuous grouting effect



(a) 前期



(b) 后期

图 8 竖向位移变化速率

Fig. 8 Curves of vertical displacement rate

图 9 为不同上覆荷载条件下, 补偿注浆率降低至 0 时所需时间的变化趋势。上覆荷载小于 100 kPa 时, 所需时间急剧减小, 上覆荷载大于 100 kPa 时, 时间呈减小趋势, 但减小幅度较小。

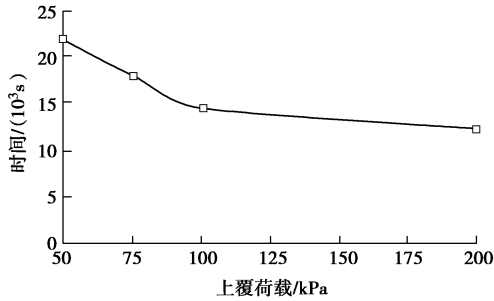


图 9 时间 - 上覆荷载曲线 (补偿注浆率为 0)

Fig. 9 Curves of time versus overlying load

图 10 为不同上覆荷载条件下, 注浆压力的变化曲线。注浆峰值压力与上覆荷载呈现出很强的线性相关性, 随着上覆荷载的增大而增大。注浆压力与上覆荷载的比值均位于 3.70~4.02 之间, 处于现场试验中注浆峰值压力比值范围 2.8~4.3^[17]内, 但略大于颗粒介质中注射试验数值模拟的峰值压力比值 3.0^[18]。这说明在注浆过程中, 以一定的注浆速率注浆时所需注浆泵压力远大于注浆点周围土体应力。

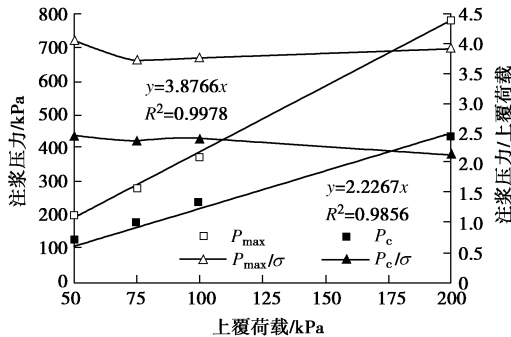


图 10 注浆压力 - 上覆荷载曲线

Fig. 10 Curves of grouting pressure versus overlying load

注浆完成后 10 s 时的压力值记为 P_c , 该压力值在一定程度上反映注浆完成后注浆体内残余压力值。 P_c 与上覆荷载呈线性关系, 但斜率明显小于注浆峰值压力, 即上覆荷载越大, 注浆完成后压力降低速率越大。 P_c 与上覆荷载的比值均在 2.15~2.5 范围内变化。

2.2 上覆荷载对重复注浆效果影响分析

为了保证注浆房屋均匀、稳定的抬升, 需要进行多点、多次、反复注浆抬升^[12], 因此有必要研究上覆荷载对单点重复注浆效果的影响。本文中重复注浆试验分三次实施, 注浆量分别为 3.333, 3.333, 3.334 mL, 总注浆量与单次连续注浆量相同, 均为 10 mL, 注浆速率为 500 mm³/s。

图 11 为不同上覆荷载条件下, 连续注浆和间隔时间分别为 10, 60 min 重复注浆时最终补偿注浆率随上覆荷载的变化曲线。

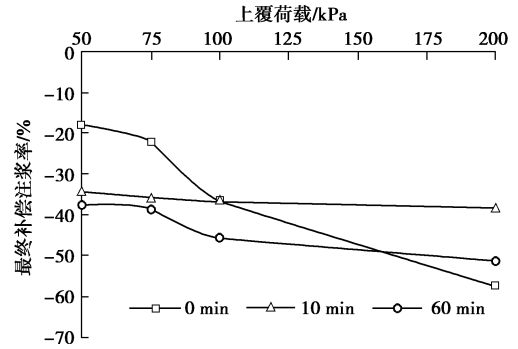


图 11 不同间隔时间条件下最终补偿注浆率 - 上覆荷载曲线

Fig. 11 Curves of final compensation grouting efficiency versus overlying load under different interval time

由图 11 可知:

(1) 当上覆荷载小于 100 kPa 时, 重复注浆时最终补偿注浆率均小于连续注浆时最终补偿注浆率; 当上覆荷载大于 100 kPa 时, 重复注浆时最终补偿注浆率大于连续注浆时最终补偿注浆率。

这主要是由两方面原因导致的: ①注浆量的影响, 如图 12 所示, 单次注浆量越大, 补偿注浆率越高, 即注浆抬升效果越好。重复注浆时, 单次注浆量较连续注浆时小, 第一次注浆时受边界影响较小, 产生相对较大的超孔隙水压力, 因而, 固结时沉降值较大。②受注浆压力的影响, 如图 13 所示, 相同上覆荷载条件下, 当上覆荷载小于 100 kPa 时, 第一次注浆峰值压力与连续注浆峰值压力相差不大; 当上覆荷载大于 100 kPa 时, 由于注浆量较小, 第一次注浆峰值压力来不及达到连续注浆峰值压力, 明显低于连续注浆峰值压力, 产生的超孔隙水压力较小, 因而, 固结时沉降值较小。以上两点的综合效果导致了不同上覆荷载条件下, 重复注浆效果和单次连续注浆效果的优劣差异。

故实际施工中, 对较轻的建筑物尽可能一次性连续注浆, 增大单次注浆量, 而较重的建筑物应多次、反复注浆抬升, 提高注浆抬升长期效果。

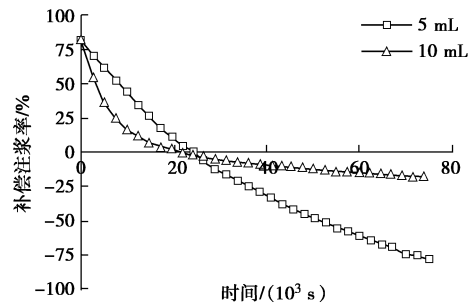


图 12 不同注浆量条件下补偿注浆率的变化曲线

Fig. 12 Curves of compensation grouting efficiency under different grouting volumes

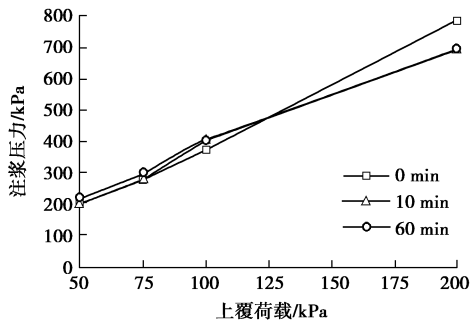


图 13 不同间隔时间条件下注浆峰值压力 - 上覆荷载曲线
Fig. 13 Curves of grouting peak pressure versus overlying load under different interval time

(2) 重复注浆时, 相同上覆荷载条件下, 间隔时间越长, 最终补偿注浆率越小, 即间隔时间为 10 min 时的最终补偿注浆率均大于间隔时间为 60 min 时的最终补偿注浆率。

图 14 为上覆荷载为 75 kPa 时, 重复注浆压力和连续注浆压力的变化曲线, 其他上覆荷载时, 重复注浆压力变化趋势基本一致。连续注浆和重复注浆的第一次注浆峰值压力相差不大。第一次注浆结束后, 间隔时间较短 ($t=10$ min) 时, 注浆点周围产生的超孔隙水压力仅消散较小部分, 导致注浆点周围土体有效应力减小, 继而使第二次、第三次的注浆峰值压力明显减小; 间隔时间较长 ($t=60$ min) 时, 注浆点周围产生的超孔隙水压力消散较多, 周围土体被压密, 孔隙率减小, 有效应力几乎恢复到第一次注浆前大小, 使得第二次、第三次的注浆峰值压力较第一次注浆峰值压力相差不大, 但明显大于间隔时间较短时的第二次、第三次注浆峰值压力, 产生较大的超孔隙水压力, 因此, 固结时沉降值较大, 最终补偿注浆率随间隔时间的增长而减小。

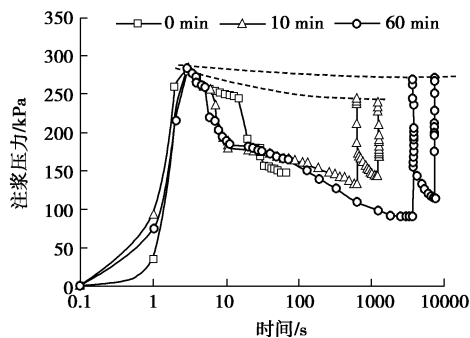


图 14 不同间隔时间条件下注浆压力的变化曲线
Fig. 14 Curves of grouting pressure under different interval time ($P=75$ kPa)

(3) 重复注浆时, 上覆荷载对最终补偿注浆率的影响较连续注浆时小。间隔时间为 10 min 时, 最终补偿注浆率随上覆荷载的增大呈递减趋势, 但减小程度较小, 这说明间隔时间较短时, 最终补偿注浆率受上覆荷载的影响较小。间隔时间为 60 min 时, 最终补偿

注浆率随上覆荷载的变化趋势与连续注浆时的变化趋势一致, 但减小程度明显小于连续注浆。

2.3 上覆荷载对超固结土注浆效果影响分析

隧道上部一定范围内的土体由于卸荷作用而处于超固结状态^[19], 因此有必要研究上覆荷载对超固结土注浆效果的影响。试验过程中, 固结荷载为上覆荷载的 n ($=OCR$) 倍, 固结完成后恢复上覆荷载值, 继续固结, 待固结达到稳定状态时开始注浆, 注浆量为 10 mL, 注浆速率为 $500 \text{ mm}^3/\text{s}$ 。

图 15 为不同超固结比的条件下, 最终补偿注浆率随上覆荷载的变化曲线。正常固结条件下, 最终补偿注浆率随上覆荷载的增大而减小; 土体处于超固结状态时, 最终补偿注浆率均大于 0。当超固结比为 1.5 时, 最终补偿注浆率在上覆荷载小于 75 kPa 时, 随上覆荷载的增大而增大, 但上覆荷载大于 75 kPa 后最终补偿注浆率增长非常缓慢; 当超固结比为 2.0 时, 上覆荷载对最终补偿注浆率几乎无影响。这主要是由于超固结比为 2.0 时, 最终补偿注浆率约等于初始补偿注浆率, 如图 16 所示, 而初始补偿注浆率的差异性几乎可以忽略, 因而, 上覆荷载对最终补偿注浆率几乎无影响。

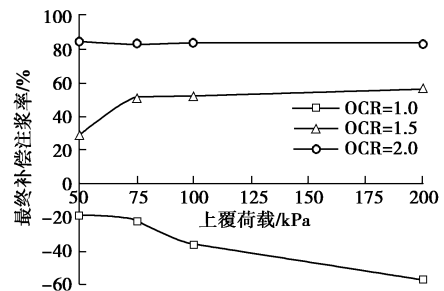


图 15 不同 OCR 条件下最终补偿注浆率 - 上覆荷载曲线
Fig. 15 Curves of final compensation grouting efficiency versus overlying load under different OCRs

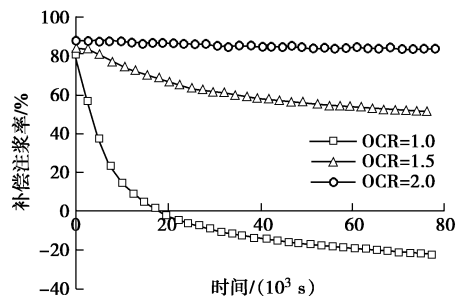


图 16 不同 OCR 条件下补偿注浆率的变化曲线 (75 kPa)
Fig. 16 Curves of compensation grouting efficiency under different OCRs

图 17 为最终补偿注浆率随超固结比的变化曲线。当上覆荷载为 50 kPa 时, 最终补偿注浆率随超固结比

线性增长; 当上覆荷载大于 50 kPa 时, 最终补偿注浆率随超固结比的增大而增大, 且当超固结比在 1.0~1.5 之间时最终补偿注浆率增大速率显著大于超固结比在 1.5~2.0 之间时最终补偿注浆率增大速率。

因此, 工程中选择注浆位置, 应优先选择土体处于超固结状态的区域, 既可以加固土体, 又可以提高注浆效果。

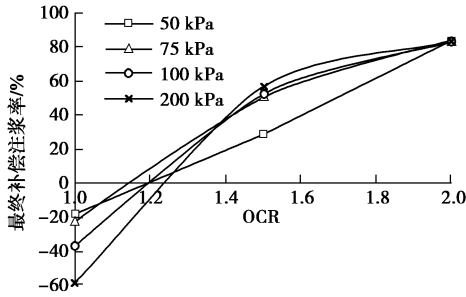


图 17 最终补偿注浆率 - OCR 曲线

Fig. 17 Curves of final compensation grouting efficiency versus OCR

图 18 为不同超固结比的条件下, 注浆峰值压力与上覆荷载比值随上覆荷载的变化曲线。正常固结状态时, 注浆峰值压力与上覆荷载比值受上覆荷载的影响较小; 超固结状态时, 相同固结比的条件下, 注浆峰值压力与上覆荷载比值整体上随上覆荷载的增大呈减小趋势, 固结比越大, 减小幅值越大。

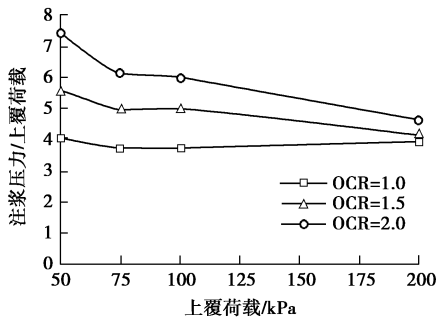


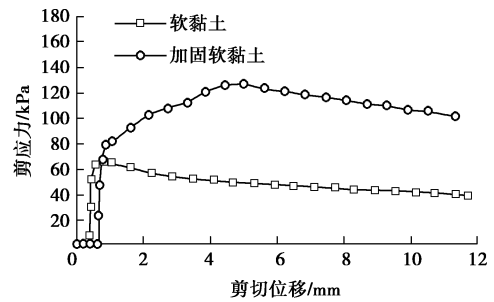
图 18 不同 OCR 条件下注浆压力 - 上覆荷载曲线

Fig. 18 Curves of normalized grouting pressure versus overlying load under different OCRs

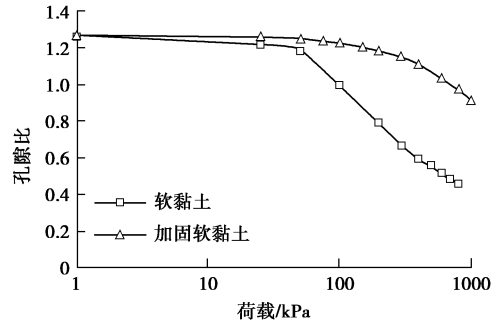
2.4 上覆荷载对加固土层注浆效果影响分析

根据前述试验成果, 土体较软时, 由于注浆抬升长期效果不理想, 因此, 在注浆抬升前对软黏土进行加固, 并研究上覆荷载对加固软黏土注浆抬升长期效果的影响。试验过程中, 将水泥烘干, 过 0.5 mm 筛, 与土体以重度比 4:100 进行混合, 其他制样过程与软黏土相同, 人工制备加固软黏土^[20]。加固软黏土的强度和刚度都有显著提高, 如图 19 所示。注浆过程为一次性连续注浆, 注浆量为 10 mL, 注浆速率为

500 mm³/s。



(a) 固结快剪试验 (P=200 kPa)



(b) 标准固结试验

图 19 软黏土和加固土层的土性试验对比曲线

Fig. 19 Comparison curves of soil property tests between soft clay and reinforced soil

图 20 为软黏土和加固软黏土中注浆后最终补偿注浆率的变化曲线。由图 20 可知, 加固软黏土中注浆后最终补偿注浆率显著高于软黏土中的最终补偿注浆率, 注浆效果显著提高。这主要是由于加固软黏土具有一定的结构性, 注浆过程中受扰动程度和范围较小, 并具有较小的压缩性, 因此, 注浆后土体的沉降值较小, 最终补偿注浆率较高。软黏土和加固软黏土中注浆后最终补偿注浆率随上覆荷载的变化趋势基本一致, 均随上覆荷载的增大而降低。由图 20 (b) 可知, 加固软黏土中注浆后补偿注浆率前期降低速率较大, 并在较短时间内达到稳定。

因此, 当在软黏土中注浆无法抬升建筑物时, 可预先加固软黏土, 提高注浆效果。

图 21 为软黏土和加固软黏土中注浆时所需注浆峰值压力随上覆荷载的变化曲线。由图 21 可知, 软黏土和加固软黏土中注浆峰值压力均随上覆荷载的增大呈线性增加。加固软黏土中注浆峰值压力较高, 但增长速率远低于软黏土中注浆峰值压力增长速率。由于软黏土中几乎无结构性, 因此, 上覆荷载为 0 kPa 时, 所需注浆峰值压力为 0 kPa, 而加固软黏土具有较强结构性, 当上覆荷载为 0 kPa 时, 仍然需要 723.52 kPa 的注浆峰值压力来克服注浆点周围土体结构性, 压密抬升土体。

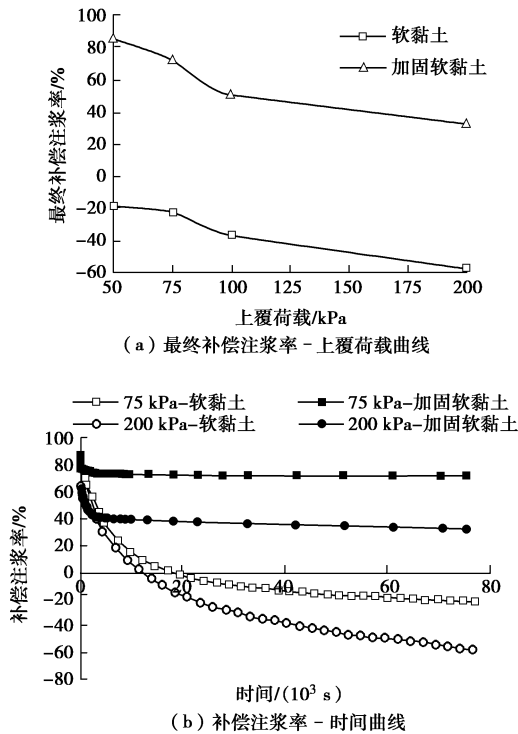


图 20 软黏土与加固土层中补偿注浆率的变化曲线

Fig. 20 Curves of compensation grouting efficiency in soft clay and reinforced soil

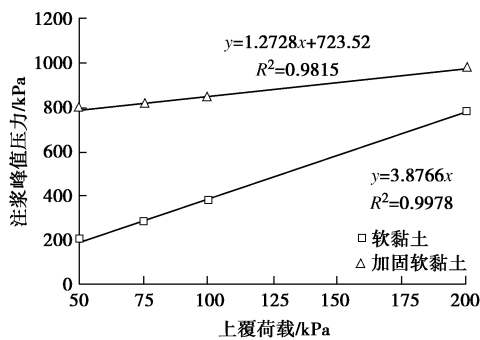


图 21 软黏土与加固土层中注浆峰值压力 - 上覆荷载曲线

Fig. 21 Curves of grouting peak pressure versus overlying load in soft clay and reinforced soil

3 结 论

本文利用一套注浆模型试验装置, 针对软黏土进行了一系列室内注浆试验, 基于试验结果可得以下 5 点结论。

(1) 连续注浆时, 正常固结土在不同上覆荷载作用下, 最终补偿注浆率随着上覆荷载的增大呈减小趋势。说明建筑物地基主要持力层存在软弱土时, 较重的建筑物难以通过在软弱土中注浆进行抬升。

(2) 连续注浆时, 注浆峰值压力随着上覆荷载的增大而增大, 且与上覆荷载呈线性关系。注浆峰值压力与上覆荷载的比值均位于 3.70~4.02 之间, 说明在

注浆过程中, 当以一定的注浆速率注浆时所需注浆泵压力远大于注浆点周围土体应力。这与现场试验实测数据规律一致。

(3) 在总注浆量相同的条件下, 当上覆荷载小于 100 kPa 时, 采用多次重复注浆时最终补偿注浆率均小于一次性连续注浆时最终补偿注浆率; 当上覆荷载大于 100 kPa 时, 重复注浆时最终补偿注浆率大于连续注浆时最终补偿注浆率; 相同上覆荷载条件下, 间隔时间越长, 最终补偿注浆率越小。因此, 较轻的建筑物尽可能一次性连续注浆, 增大单次注浆量, 而较重的建筑物应多次、反复注浆抬升, 提高注浆长期效果。

(4) 对超固结土, 注浆效果优于正常固结土中注浆效果。当超固结比为 1.5 时, 最终补偿注浆率在上覆荷载小于 75 kPa 时, 随上覆荷载的增大而增大, 但当上覆荷载大于 75 kPa 或者超固结比提高到 2.0 时, 最终补偿注浆率几乎不随上覆荷载的变化而变化。因此, 工程中选择注浆位置, 应优先选择土体处于超固结状态的区域, 既加固土体, 又提高了注浆效果。

(5) 对软黏土进行加固后, 最终补偿注浆率显著高于未加固的软黏土中的最终补偿注浆率, 注浆抬升效果明显。因此, 当在软黏土中注浆无法抬升建筑物时, 可预先加固软黏土, 提高注浆效果。

本次试验未考虑欠固结土的注浆效果及渗透和压滤对注浆效果的影响, 且室内试验不可避免地受尺寸效应的影响, 还需要进一步进行现场注浆试验, 以便对注浆长期效果有更好的研究。

参考文献:

[1] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: State of the Art Volume, 1969: 225 - 290.

[2] CORDING E J, HANSMIRE W H. Displacements around soft ground tunnels[C]// 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tomo, 1975: 571 - 632.

[3] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil movement induced by tunneling and their effects on pipelines and structures[M]. Glasgow: Chapman & Hall, 1986.

[4] 张晓丽, 张顶立, 王梦恕. 既有地铁注浆抬升合理位置的确定[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 712 - 717. (ZHANG Xiao-li, ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu. Determination of proper position of grouting during lifting the existing subway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 712 - 717. (in Chinese))

- [5] MAIR R J, RANKIN W J, ESSLER, et al. Compensation grouting[J]. *World Tunnelling and Subsurface Excavation*, 1997, **7**(1): 39 - 41.
- [6] SCHEWEIGER H F, KUMMERER C. Numerical modeling of settlement compensation by means of fracture grouting[J]. *Soils and Foundations*, 2004, **44**(1): 71 - 86.
- [7] WISSER C, AUGARDE C E, BURD H J. Numerical modeling of compensation grouting above shallow tunnels[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2005, **29**: 443 - 471.
- [8] 唐智伟, 赵成刚, 张顶立. 地下工程抬升注浆设计方法及其抬升效果预测研究[J]. *土木工程学报*, 2007, **40**(8): 79 - 84. (TANG Zhi-wei, ZHAO Cheng-gang, ZHANG Ding-li. Design of displacement grouting and prediction of the effect for construction of underground structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, **40**(8): 79 - 84. (in Chinese))
- [9] 孙峰, 张顶立, 王臣. 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 Feng, ZHANG Ding-li, WANG Chen. Analysis of raising pipeline by fracture grouting and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(3): 932 - 938. (in Chinese))
- [10] AU S K A, SOGA K, JAFARI M R. Factors affecting long-term efficiency of compensation grouting in clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, **129**(3): 254 - 262.
- [11] SOGA K, AU S K A, BOLTON M D. Laboratory investigation of multiple grout injections into clay[J]. *Géotechnique*, 2004, **54**(2): 81 - 90.
- [12] 易小明, 张顶立, 逢铁铮. 房屋注浆抬升实践与监测分析[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(12): 3776 - 3782. (YI Xiao-ming, ZHANG Ding-li, PANG Tie-zheng. Practice and monitoring analysis of building lifting due to grouting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(12): 3776 - 3782. (in Chinese))
- [13] BAI Y, YANG Z, JIANG Z. Key protection techniques adopted and analysis of influence on adjacent buildings due to the bund tunnel construction[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, **41**: 21 - 34.
- [14] WANG S Y, CHAN D H, LAM K C. A new laboratory apparatus for studying dynamic compaction grouting into granular soils[J]. *Soils and Foundations*, 2013, **53**(3): 462 - 468.
- [15] WANG S Y, CHAN D H, LAM K C. Experimental study of the effect of fines content on dynamic compaction grouting in completely decomposed granite of Hong Kong[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, **23**: 1249 - 1264.
- [16] SHIRLAW J N, DAZHI W, GANESHAN V. A compensation grouting trial in Singapore marine clay[M]// *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. KUSAKABE O, FUJITA K, MIYAZAKI Y, eds. Rotterdam: Balkema, 1999: 149 - 154.
- [17] ZHANG D, FANG Q, HOU Y. Protection of buildings against damages as a result of adjacent large-span tunneling in shallowly buried soft ground[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**: 903 - 913.
- [18] ZHANG F, DAMJANAC B, HUANG H. Coupled discrete element modeling of fluid injection into dense granular media[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, **118**: 2703 - 2722.
- [19] LEE C J, WU B R, CHEN H T. Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, **21**: 119 - 132.
- [20] HORPIBULSUK S, MIURA N, BERGADO D T. Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, **130**(10): 1096 - 1105.