第 53 卷第 11 期
2025 年 11 月

同济大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE)

Vol. 53 No. 11
Nov. 2025

文章编号：0253-374X(2025)11-1682-09　　**DOI**：10.11908/j.issn.0253-374x.24201

软土地层双液微扰动注浆浆液扩散规律试验研究

王鲁杰[1,2]，王如路[2]，梁发云[1]，闫静雅[2]，雷　丹[3]，周　攀[1]

（1. 同济大学 土木工程学院，上海 200092；2. 上海申通地铁集团有限公司，上海 200070；
3. 上海勘察设计研究院(集团)股份有限公司，上海 200093）

摘要：依托软土地区某深基坑项目开展原位双液微扰动注浆试验，结合实时监测、静力触探、现场开挖等手段，探究浆液在软土地层中的扩散范围，剖析浆脉在扩散范围内的劈裂－挤密形态，揭示单孔沿深度连续注浆条件下周围土体位移、应力及孔隙水压力等随时间和空间的变化规律。研究表明，注浆引起的孔周土体侧向位移、水压力和土压力随距离呈现幂级数衰减规律，且在2m范围内急剧衰减；开挖所得浆脉最远扩散至2.5m，在距注浆孔0.5m范围内以充填挤密为主，在1m范围外以劈裂为主，且距注浆孔1m以外的实测浆脉和理论注浆量体积比与按土体侧向位移计算体积膨胀率基本吻合。研究结果可为软土盾构隧道的注浆纠偏提供现场试验依据和实测数据参考。

关键词：微扰动注浆；软土地层；现场试验；浆液扩散；孔隙水压力

中图分类号：TU433　　**文献标志码**：A

Experimental Study on Diffusion Law of Double-liquid Micro-disturbance Grouting in Soft Soil

WANG Lujie[1,2], *WANG Rulu*[2], *LIANG Fayun*[1], *YAN Jingya*[2], *LEI Dan*[3], *ZHOU Pan*[1]

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Shentong Metro Group, Shanghai 200070, China; 3. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co, Ltd, Shanghai 200093, China)

Abstract: This study is based on a deep foundation pit project in a soft soil area, conducted in-situ micro-disturbance double-liquid grouting experiments. By integrating real-time monitoring, static cone penetration tests, and on-site excavation methods, the study explores the grout diffusion range in soft soil strata. It also analyzes the fracture-compaction morphology of grout veins within the diffusion range and reveals the spatial and temporal variations in surrounding soil displacement, stress, and pore water pressure during continuous grouting along the depth of a single borehole. The findings demonstrate that the lateral displacement of the soil, pore water pressure, and soil pressure induced by grouting follow a power-law attenuation with distance, with rapid decay within 2 m. Excavation results showed that grout veins extend as far as 2.5 m, primarily exhibiting compaction filling within 0.5 m of the grouting borehole and fracturing beyond 1 m. Moreover, the measured grout volume beyond 1 m aligns with the theoretical volume expansion ratio calculated through inclinometer readings of soil deformation. These results provide a solid experimental basis and extensive data reference for grouting corrections in soft soil shield tunnels.

Keywords: micro-disturbance grouting; soft soil; field test; grout diffusion patterns; pore water pressure

在大规模的城市地下空间开发背景下，轨道交通作为重要地下基础设施与生命线工程得到了快速发展，因为盾构隧道多采用盾构法施工，接缝较多，以及所赋存的软土土层呈现高含水率，高压缩性等特点，极易受外部施工作业影响而产生较大横向变形，对其安全运营造成潜在危害[1-2]，双液(水泥基-水玻璃)注浆技术因两种溶液能迅速反应生成硅胶和硅酸钙凝胶，起到胶结和填充孔隙的作用，使土壤的强度和承载能力提高，已广泛应用于软土地区盾构隧道横向变形过大的病害治理[3-5]，病害治理包括阻止隧道横向变形、整体水平位移进一步增大和对其进行纠偏等。

双液注浆根据浆液状态可分为挤密、劈裂、渗透和充填注浆[6-7]，对于软土地区黏性土，根据浆液水灰比和注浆速度不同，可分为挤密为主或挤密伴随劈

收稿日期：2024-06-14
基金项目：上海市优秀技术带头人计划(21XD1430900)；国家重点研发计划(2016YFC0800200)
第一作者：王鲁杰，博士生，主要研究方向为隧道及地下工程。E-mail：2008jie2008@163.com
通信作者：梁发云，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为土力学与基础工程。E-mail：fyliang@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

裂[8]。围绕注浆对周边土体的影响情况，相关学者已取得了一些研究成果，如张忠苗等[9]通过注浆室内试验得出随着浆液水灰比的增大，浆液的扩散方式逐渐由挤密为主向劈裂为主过渡；Nichols 等[10]通过离心机试验研究了不同埋深、不同注浆材料对浆液渗透形状的影响；Au[11]通过室内模拟试验研究了土体破裂模式和固结效果；张庆松等[12]、Zheng 等[13-14]通过室内试验研究了在欠固结土和结构性土中注浆控制土体竖向变形的效果。李鹏等[15]基于大比例模型试验模拟注浆的劈裂现象，揭示了浆脉分布规律，并将劈裂过程划分为土体劈裂能量积聚、劈裂和浆液能量转移3个阶段。程雪松等[16]结合现场注浆试验，研究土质条件、注浆量、注浆距离、注浆长度及注浆深度对注浆效果的影响。Masini 等[17]、Guo 等[18]、Zhou 等[19]分别从理论方面给出了注浆扩张理论模型，Wang 等[20]采用数值模型研究了浆液扩散规律及影响因素。这些研究成果均为工程实际提供指导。然而基于小孔扩张理论模型中的弹塑性影响半径不能真实反映土体的劈裂与挤密相结合的注浆形态，室内模型试验较难反映未扰动原状土体的应力状态，现场注浆试验也较少进行大深度的开挖了解实际的浆液扩散规律，因此有必要开展软土地层双液浆液原位试验，结合现场开挖，确定浆液扩散范围及对土体的影响规律，进而验证和改进理论解析结果。

本文以上海某邻近地铁待开挖基坑项目开展现场注浆试验，全面记录注浆过程周围土体的侧向和竖向位移以及应力等随时间和空间的变化规律，并在孔隙水压力消散稳定后进行静力触探及现场开挖，通过详实的数据分析浆液在软土地层中的扩散范围及对土体的影响规律，可供类似工程借鉴，为注浆扩孔理论提供数据支撑，为注浆纠偏提供参考。

1　试验方案

1.1　注浆试验方案

为掌握双液微扰动注浆过程软土地层的位移及应力沿距离的衰减情况，以注浆孔为中心，分别在距离注浆孔1m、2m、3m、5m位置埋设测斜管、磁环、水压力计与土压力盒等测试元件及进行静力触探，测量不同深度处的水平位移、分层沉降、以及水、土压力，数据稳定后进行现场开挖，实测浆液的扩散形态，试验平、剖面示意图如图1、图2所示。

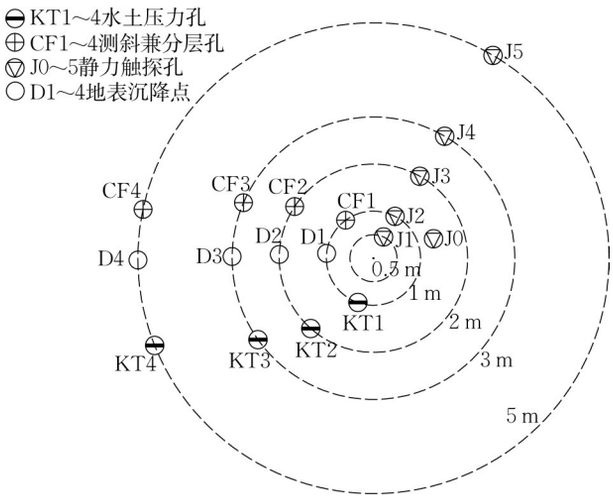
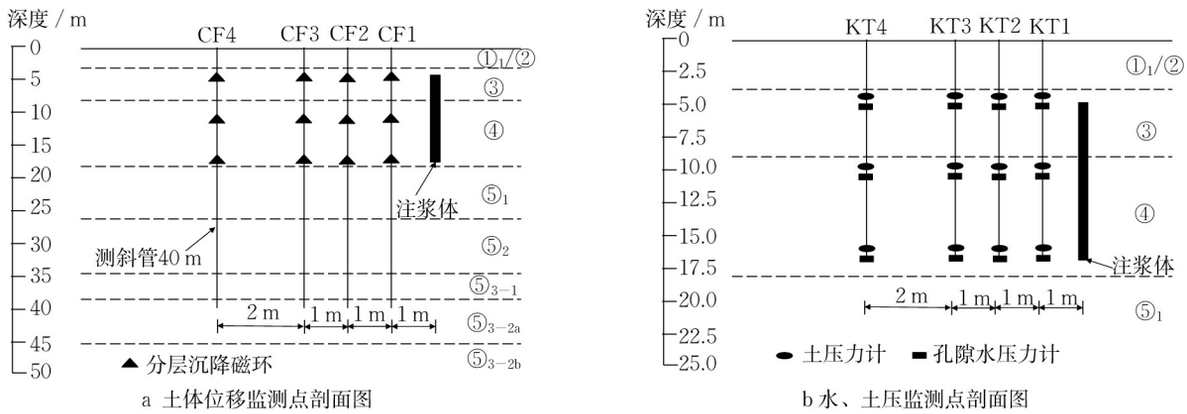


图1　平面图

Fig.1　Position relation plan

试验场地属于上海典型的古河道地层，土体物理力学参数如表1所示，试验测项布设如表2所示。



a 土体位移监测点剖面图　　b 水、土压监测点剖面图

图 2　试验设计剖面图

Fig.2　Test design section

表1 土体物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil

土层编号	土层名称	重度/kN·m^{-3}	摩擦角/°	粘聚力/kPa	比贯入阻力/MPa
①$_1$	杂填土	18.0	/	/	/
②	黏土	18.2	17.0	19.0	0.75
③	淤泥质粉质黏土	17.5	14.5	13.0	0.48
④	淤泥质黏土	17.0	12.0	12.0	0.55
⑤$_1$	粉质黏土	17.9	16.0	16.0	1.17
⑤$_2$	砂质粉土夹粉质黏土	18.5	26.0	11.0	5.19
⑤$_{3-1}$	粉质黏土	18.5	22.0	17.0	2.38
⑤$_{3-2a}$	砂质粉土	18.9	33.0	4.0	6.17
⑤$_{3-2b}$	粉砂	19.0	33.5	2.0	9.85
⑤$_{3-3}$	粉质黏土夹砂质粉土	18.9	28.0	17.0	4.11
⑦	粉砂	19.2	34.5	3.0	11.77

表2 试验测试内容

Tab.2 Test contents

测项	距离/m	深度/m	测点编号
土体测斜	1、2、3、5	0～40	CF1～CF4
分层沉降	1、2、3、5	5、11、17	
地表沉降	1、2、3、5	/	D1～D4
孔隙水压力	1、2、3、5	5、11、17	KT1～KT4
土压力	1、2、3、5	4.5、10.5、16.5	
静力触探	0.5、1、2、3、5	0～25	J0～J5

为了防止近距离试验孔对远距离试验孔的遮挡影响，各试验孔相对于注浆孔采用错位布设的方式。分层沉降磁环套在测斜管外壁的相应位置，随测斜管下放并埋设至相应深度，测斜孔采用固定配比水泥与膨润土双液浆进行填孔。因试验场地空间有限，孔隙水压力计与土压力盒固定在L型角钢上面，采用同孔埋设的方式，每组孔隙水压力计与土压力盒上下间隔0.5m，其中孔隙水压力计上、下20cm采用中粗砂填设，其他范围采用黏土球填设，填料深度采用有刻度的测绳进行精确探测，确保填孔的质量。

1.2 注浆实施过程

试验采用钻注拔一体化设备(如图3所示)，注浆管为外径32 mm、内径20 mm的1m长钢管，开闭式注浆前端装置内有8个直径4 mm的注浆孔，呈双排梅花形均匀布置，下压时密闭，拔管时开启。注浆材料为水灰比0.8的水泥浆和模数3.0的水玻璃，水泥浆与水玻璃体积比为2:1，采用马氏漏斗粘度计测得浆液流动性如表3，双液浆初凝时间为40～45s。

a 钻注拔一体化设备管　　b 注浆管　　c 开闭式注浆前端装置管

图3 注浆设备及构造

Fig.3 Grouting equipment and structure

注浆过程为先振动下管至地面以下17m，随后启动注浆泵分别压注水泥浆和水玻璃，注浆压力为0.4～0.6MPa，水泥浆泵流量为15L·min^{-1}，水玻璃泵流量为7.5L·min^{-1}，注浆1min拔管一次，拔管高度为10cm，完成1m后暂停注浆并拆除1节注浆管，直至拔管至地面以下5m，总注浆量为2 700L，注浆深度与时间(包含拆管时间)的对应情况如表4所示。

表3 浆液流动性

Tab.3 Fluidity of slurry

材料	流动性/s
纯水	26''13
水灰比0.8水泥浆液	33''77
35°Be水玻璃	43''56

表4　注浆过程

Tab.4　Grouting process

注浆深度/m	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5
注浆时间/min	0	13	29	42	53	69	82	96	109	124	138	150	160

2　注浆试验实测结果分析

2.1　地层水平位移

注浆引起的周围土体侧向位移如图4所示。通过图4a～4d均可以看出,土体侧向位移最大基本位于注浆体的中部,并随着距注浆孔距离的增加,土体侧向水平位移减小,注浆结束后土体侧向位移略有回弹,该结论与郭景琢等[21]以及文献[16]的实测数据规律一致,但与文献[16]不同的是最大土体侧向位移并非位于注浆结束深度处,而是基本位于注浆体的中部约11m附近,造成此现象的原因为注浆对周围土体影响是按球孔扩张发展,随着注浆管的上移,注浆影响范围内土体的侧向位移不断累积,当注浆位置影响范围超过初始注浆球孔扩张半径时,土体侧向位移达到最大值,本次注浆体长达12m,上部一定范围已经超过底部注浆影响范围,而文献[16]中注浆体深度约5m,尚在底部注浆影响范围内。

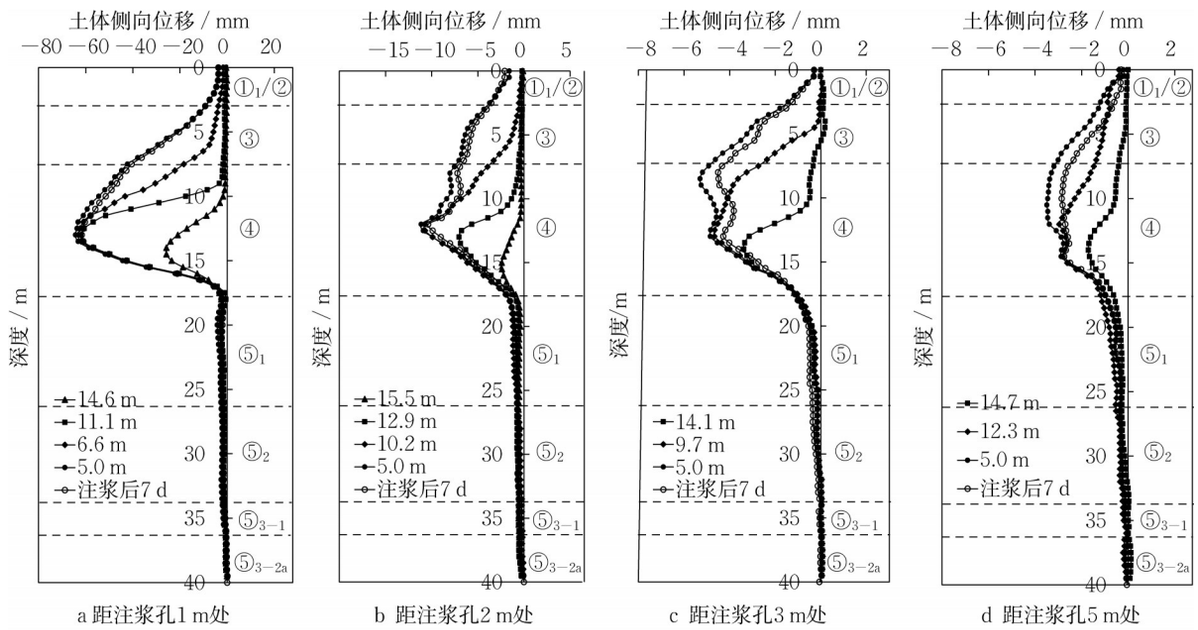


图4　土体侧向位移

Fig.4　Soil lateral displacement

另外,自注浆体底向上,土体侧向位移为先增大后减小的外凸曲线,并且注浆体上部对应土体侧向位移小于下部,分析认为,随注浆管上移,由于自由地表面存在,表层土体存在竖向隆起,从而导致侧向位移减小,这也与下文中所测得的土体竖向位移相一致。

基于现场获取的不同距离处土体侧向位移实测数据,基于差值拟合方法,绘制出的实测范围内土体侧向位移等值线云图如图5所示。从图中可以看出,土体侧向位移主要发生在注浆深度范围内,并且近距离处的最大位移发生在注浆中心偏下位置,而随着距注浆孔距离增加,等值线逐渐向侧上方扩展,说明注浆对周围土体的影响随着距离向侧上方传导。

深度11m位置土体不同距离处土体侧向位移及回弹量如图6所示,注浆引起的周围土体侧向位移随距离呈现幂级数衰减规律,且在2m范围内急剧衰减,距注浆孔2m处土体侧向位移仅为1m处的16%;注浆结束后土体侧向位移回弹量占比随距离增加呈幂级数增加规律,1m范围内回弹占比仅约5%,而超过3m后注浆深度范围平均回弹量占比保持不变,分析认为在主影响范围内浆液以挤密-劈裂形式扩散,以塑性变形为主,回弹较小,而超过3m后主要是由于超静孔隙水压力消散而引起的固结。

2.2　地层竖向位移

注浆引起的不同距离处的地表竖向位移曲线如

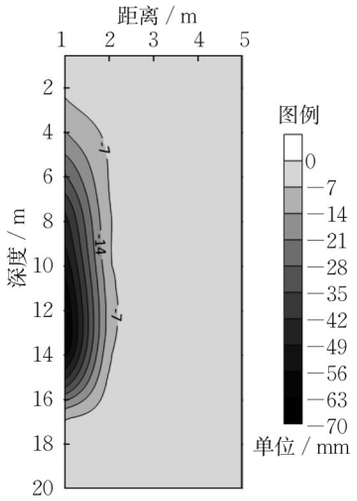


图5 侧向位移等值线云图

Fig.5 Lateral displacement contour cloud map

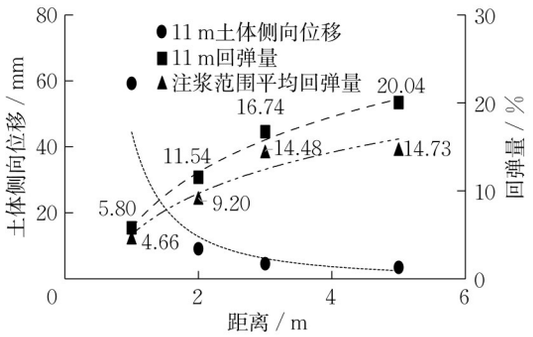


图6 深度11m处土体侧向位移

Fig.6 Lateral displacement of soil at depth 11m

图7所示。注浆引起的地表竖向位移随距离不断衰减,监测获取的最大地表隆起约3.1mm,位于距离注浆孔1m位置,注浆引起距离5m处的地表隆起最大值约0.4mm。地表随着注浆施工而不断上抬,注浆完成后随着超静孔隙水压力的消散,地表竖向位移随之回落,注浆完成后24h的竖向位移平均回落率近60%。

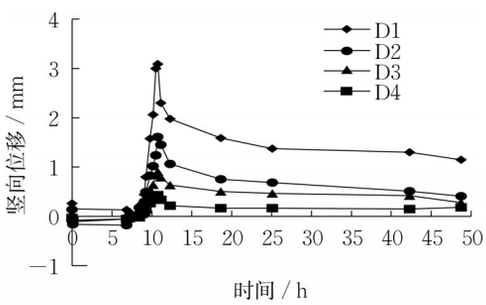


图7 不同距离处地表竖向位移曲线

Fig.7 Vertical displacement curve of surface at different distances

注浆引起的不同深度土体竖向位移曲线如图8所示。从图中可以看出,随距注浆孔距离增加,不同深度土体竖向位移均不断减小。距离注浆孔1m处,深度17m、11m、5m处最大竖向位移分别为−6.5mm、9.0mm、10.0mm,而距离注浆孔5m处分层沉降在2mm以内。

位于17m深度处的土体均先表现为下沉,然后略有回弹;位于11m深度处的土体,在注浆深度位于11m以下时表现为上抬,当注浆深度超过11m后,土体竖向变形略有下沉;位于5m深度处土体在注浆过程中均表现为上抬。即各深度的土体竖向位移与注浆位置呈现出很强的相关性。注浆完成之后,各深度土体竖向位移均有一定的回弹。

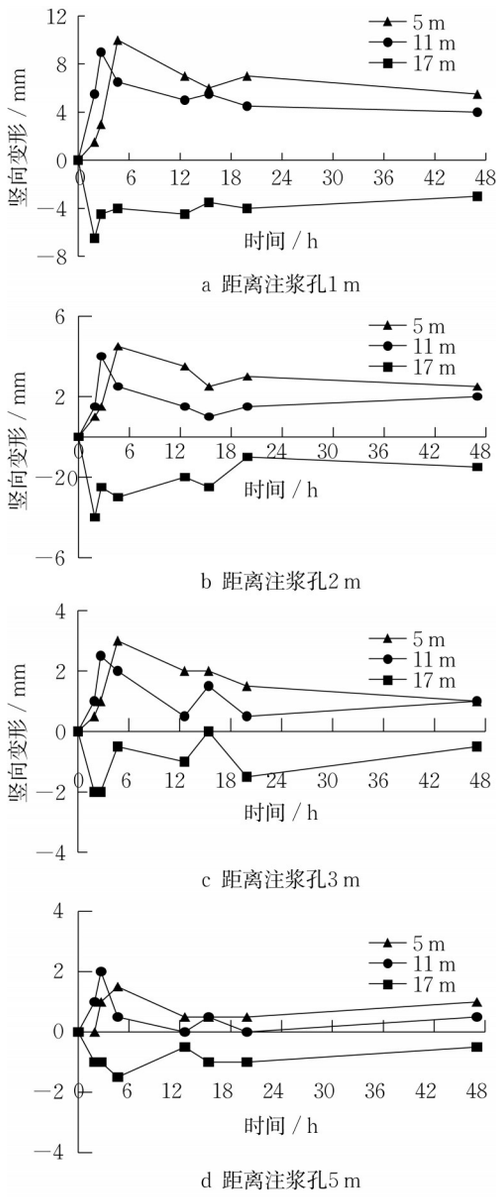


图8 不同深度分层沉降曲线

Fig.8 Stratified settlement curve at different depths

2.3　水压力和土压力分布

注浆引起的不同深度土压力和孔隙水压力变化峰值如图9所示。由图9可以看出,注浆引起的孔隙水压力及土压力随着距注浆孔距离的增加逐渐衰减,在2m范围内急剧衰减,在5m范围内,由于连续注浆的叠加影响使注浆体中部的水、土压力明显大于注浆体顶、底部,而当距离达5m时,不同深度处水土压力基本保持一致,说明此注浆工艺影响距离基本为5m。

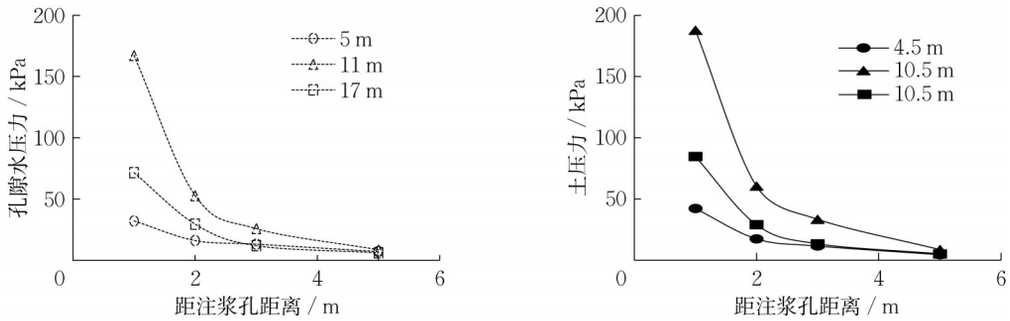


图9　不同位置水、土压力峰值数据

Fig.9　Maximum water and earth pressure at different locations

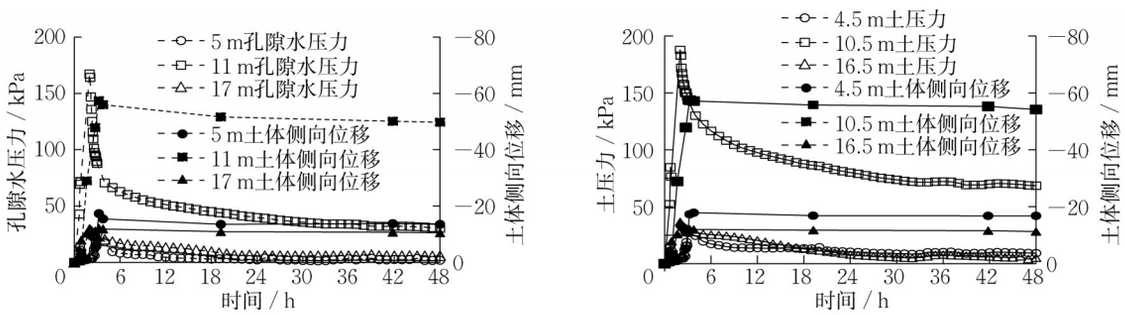


图10　距注浆孔1m处水、土压力及土体侧向位移变化历时曲线

Fig.10　Water and earth pressure and lateral displacement duration curve at 1m distance from grouting hole

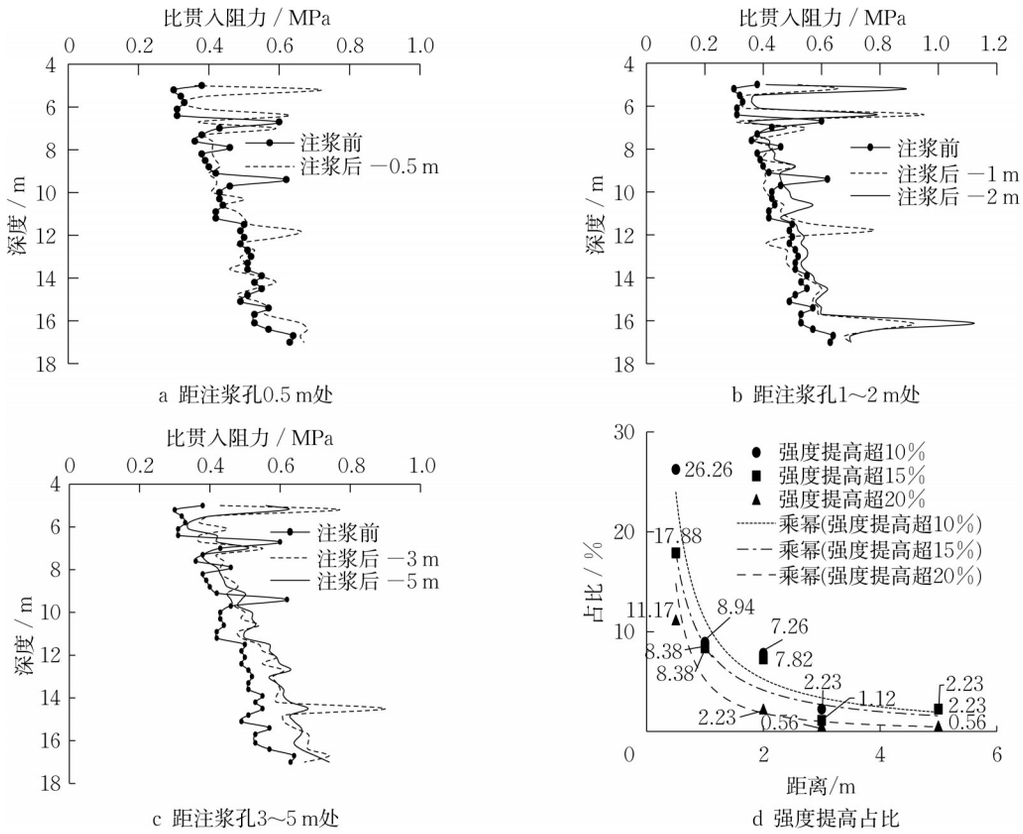
由图10可以看出,水、土压力峰值与注浆位置高度相关,随注浆深度埋深17m、11m、5m处水土压力顺序达峰值,并且17m、5m处的峰值较接近,而11m处的峰值最大,与前文土体侧向位移相一致,主要是因为埋深11m受上部及下部注浆叠加的影响。埋深17m处水土压力基本于注浆瞬时达到峰值,并随着注浆位置的上移,水土压力急剧消散,在注浆完成时孔隙水压力已由71.59kPa衰减为21.88kPa,衰减量达69.4%,此时土体的侧向位移达到最大值,埋深11m、5m处的变形规律与17m处基本相同。埋深5m处水土压力基本于注浆完成时达到峰值,也反映出当注浆位置上方再无注浆时,水土压力及土体侧向位移最大值均位于注浆深度处,与文献[16]的规律一致。

同时,注浆引起的土压力变化规律与孔隙水压力变化规律基本一致,但土压力增量略大于孔隙水压力,并且随着注浆结束,土压力的下降速率要小于孔隙水压力的下降速率,截止注浆后48h时,11m深度处的土压力衰减至67.1kPa,而孔隙水压力衰减至29.4kPa,因此将引起周围土体的有效应力得到提升,一起程度上起到加固土体的作用。

2.4　静力触探

注浆前后静力触探结果如图11所示。由图11a~11c可以看出,注浆后距注浆孔5m范围土体强度普遍有所提高,但沿深度方向存在较多波动,并且2m范围波动多。

为便于分析,将注浆后比贯入阻力沿深度分别与注浆前进行对比,不同距离强度提高占比如图11d所示,由图可以看出,距注浆孔0.5m处,强度提高超10%的占比达26.26%;距注浆孔1~2m范围强度提高超10%的占比为7.82~8.94%;而距注浆孔3m以外强度提高超10%的占比不足2.3%。强度提高情况与下文现场开挖数据较吻合,通过对比分析认为注浆的主影响半径为3m,其中距离注浆孔0.5m范围内浆液以挤密为主,1~2m范围内浆液以劈裂为主,而3m以外的强度提高多为超孔隙力水压力消散引起土体固结导致。



a 距注浆孔0.5 m处　b 距注浆孔1～2 m处　c 距注浆孔3～5 m处　d 强度提高占比

图11　静力触探数据

Fig.11　Static sounding data

3　注浆效果现场检测与建议

3.1　注浆效果现场检测

试验完成后为检测注浆的实际效果，对注浆区域进行现场开挖，深度约12m处现场浆脉如图12所示。

实测浆脉与总浆脉的体积比如图13所示，由图13可以看出，浆脉距注浆孔最远约2.5m，在0.5m范围内浆脉占总浆脉比例约45.2%，占范围内土体比例约12.9%；在1m范围内浆脉占总浆脉比例约74.7%，占范围内土体比例约5.3%；在2m范围外浆脉占总浆脉比例约3.4%，小于5%，此范围的影响已很小，在此情况下劈裂影响范围约为2m。

a 浆脉分布情况　b 挤密浆脉形态　c 劈裂浆脉宽度

图12　现场开挖及浆脉

Fig.12　Site excavation and grouting

由图13可以看出，距注浆孔0.5m处理论注浆量与土体比值为25.5%，而实测浆脉与土体比值仅为12.9%，这是因为假设注浆量全分布于0.5m范围内的土体内与实测不符，实测在0.5m范围内浆脉占总浆脉比例仅为45.2%，也侧面说明双液微扰动注浆以挤密与劈裂相结合的形态分布；但距注浆孔1m范围外所得实测浆脉和理论注浆量与土体比值与按土体测斜计算体积膨胀率基本吻合，当无实测数据时，1m以外体积

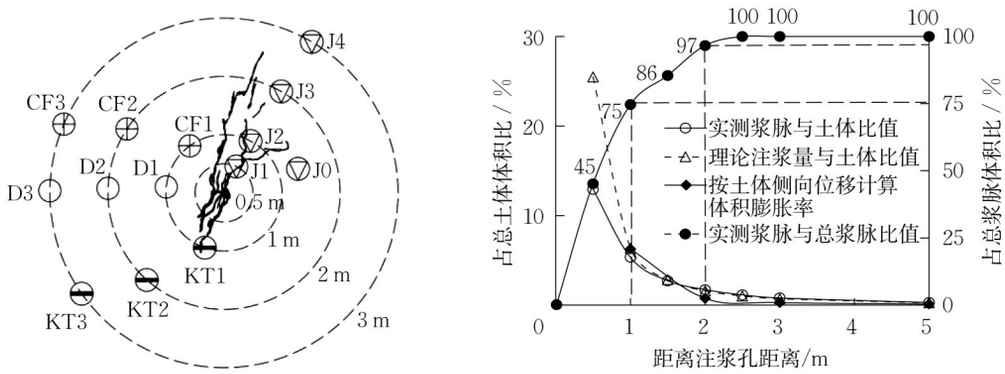


图 13　实测浆脉体积比

Fig.13　Measured grouting volume ratio

膨胀率可按理论注浆量计算选取,为数据模拟和理论计算提供参考。

根据以上数据可以认为,随与注浆孔距离的增加,双液微扰动注浆对周边土体的影响由挤密向劈裂转变,挤密、劈裂引起土体发生塑性破坏主要集中生在2m范围内,在0.5m范围内以挤密为主,在0.5~2m范围内以劈裂为主,而且浆脉并未以注浆孔为中心沿各方向劈裂,存在一定离散性;双液微扰动注浆引起2m范围外土体侧向位移主要由体积膨胀引起。

3.2　注浆纠偏建议

针对上海典型土层,采用本文注浆参数在距注浆孔1m处土体可产生最大约60mm的侧向位移,在距注浆孔2m处土体仍可产生最大约10mm的侧向位移,注浆可较明显的使被纠偏物周围的土层朝预期方向偏移,为达到较好的注浆纠偏效果,在深度方向,可取纠偏物侧向变形最大位移以下注浆影响范围(约5m)作为注浆深度,减小过大注浆深度对材料的浪费,但若注浆深度未超过注浆影响范围,注浆结束位置宜位于纠偏物侧向变形最大位移处,这样可以使目标位置产生最大的侧向位移;在水平方向,纠偏物距注浆孔不宜超过3m,否则需要更多的孔数来达到同样的纠偏效果。同时纠偏过程应考虑较近距离注浆可能对纠偏物产生的整体位移,为避免纠偏物整体的水平位移,可在纠偏物的两侧跳孔注浆施工。

4　结论

本文基于上海某邻近地铁待开挖基坑项目,采用现场试验方法详细分析了双液微扰动注浆引起不同距离和深度处土体应力和位移变化规律,主要得到以下结论:

(1)双液微扰动注浆对周围土体的应力、位移的影响随距离均呈现幂级数的衰减规律,在2m范围内以挤密、劈裂为主,在2m范围外以体积膨胀为主,且与注浆中心点距离超过2m后,引起的土体侧向位移小于10mm,应力增量小于60kPa。

(2)自注浆体底向上土体侧向位移为先增大后减小的外凸曲线,随着注浆管的上移,注浆影响范围按球孔扩张发展,注浆沿竖向显著的影响范围约4.5m~5.5m,超过5.5m后,土体的位移增加不显著,土体的应力增加速率小于消散速率,因此对相应位置上、下5m范围内进行注浆会产生明显修复效果。

(3)位于11m深度处的土体竖向位移随着注浆深度的变化先上抬后下沉,但下沉量小于上抬量,因此为了控制注浆对象的竖向位移,注浆中心应位于注浆对象中心点偏上位置。

(4)约75%的浆液集中于距注浆孔1m范围内,距注浆孔1m范围外所得实测浆脉和理论注浆量与土体比值与按土体侧向位移计算体积膨胀率基本吻合,当无实测数据时,1m以外体积膨胀率可按理论注浆量计算选取,为数据模拟和理论计算提供参考。

作者贡献声明:

王鲁杰:论文框架搭设,数据处理,撰写文稿;
王如路:注浆试验的指导;
梁发云:论文框架指导,修改文稿;
闫静雅:协助完成现场注浆;
雷丹:现场土体相关数据监测;
周攀:参与论文的修改。

参考文献:

[1]　陈兴年,刘国彬,侯学渊. 挤压注浆在上海地区的发展探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(3):487.
CHEN Xingnian, LIU Guobin, HOU Xueyuan. Discussion on compaction grouting in shanghai area [J]. Chinese Journal of Rock

Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 487.

[2] 王如路,张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制标准研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1092.
WANG Rulu, ZHANG Dongmei. Evolution of transverse deformation and assessment index for operation shield tunnel under surface surcharge in soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1092.

[3] ZHANG Dongmei, HUANG Zhongkai, WANG Rulu, *et al*. Grouting-based treatment of tunnel settlement: practice in Shanghai [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 181.

[4] ZHANG Dongming, ZHANG Dongmei, SOGA K, *et al*. Rehabilitation of overdeformed metro tunnel in shanghai by multiple repair measures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(11): 04019101.

[5] ZHENG Gang, PAN Jun, CHENG Xuesong, *et al*. Use of grouting to control horizontal tunnel deformation induced by adjacent excavation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(7): 05020004.

[6] KOMIYA K, SOGA K, AKAGI H, *et al*. Soil consolidation associated with grouting during shield tunnelling in soft clayey ground [J]. Geotechnique, 2001, 51(10): 835.

[7] 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.

[8] 唐亚周,雷进生,马波,等. 不同均质度的粘土劈裂注浆特性及效果分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(2): 5474.
TANG Yazhou, LEI Jinsheng, MA Bo, *et al*. Study on clay split grouting with different homogeneity and its effect [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(2): 547.

[9] 张忠苗,邹健,贺静漪,等. 黏土中压密注浆及避裂注浆室内模拟试验分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1818.
ZHANG Zhongmiao, ZOU Jian, HE Jingyi, *et al*. Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1818.

[10] NICHOLS S C, GOODINGS D J. Physical model testing of compaction grouting in cohesionless soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(9): 848.

[11] AU S K A, SOGA K, JAFARI M R, *et al*. Factors affecting long-term efficiency of compensation grouting in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(3): 254.

[12] 张庆松, 张连震, 刘人太, 等. 水泥-水玻璃浆液裂隙注浆扩散的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2015(8): 2159.
ZHANG Qingsong, ZHANG Lianzhen, LIU Rentai, *et al*. Laboratory experimental study of cement-silicate slurry diffusion law of crack grouting with dynamic water [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(8): 2159.

[13] ZHENG Gang, ZHANG Xiaoshuang, DIAO Yu, *et al*. Experimental study on grouting in underconsolidated soil to control excessive settlement [J]. Natural Hazards, 2016, 83(3): 1683.

[14] ZHENG Gang, ZHANG Xiaoshuang, DIAO Yu, *et al*. Experimental study on the performance of compensation grouting in structured soil [J]. Geomechanics and Engineering, 2016, 10(3): 335.

[15] 李鹏,张庆松,张霄, 等. 基于模型试验的劈裂注浆机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3221.
LI Peng, ZHANG Qingsong, ZHANG Xiao, *et al*. Analysis of fracture grouting mechanism based on model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3221.

[16] 程雪松, 高洁, 潘军, 等. 注浆水平纠偏的作用规律与影响因素[J]. 土木与环境工程学报, 2022, 44(5): 136.
CHENG Xuesong, GAO Jie, PAN Jun, *et al*. Effect and influencing factors of the grouting on the horizontal deformation control [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 136.

[17] MASINI L, RAMPELLO S, SOGA K. An approach to evaluate the efficiency of compensation grouting [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(12): 04014073.

[18] GUO Fengqi, LIU Xiaotan, TONG Wuqi, *et al*. Prediction of ground surface displacement caused by grouting [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(9): 3564.

[19] ZHOU Hang, LIU Hanlong, ZHA Yahui, *et al*. Influence of stress anisotropy on the cylindrical cavity expansion in undrained elastic-perfectly plastic soil [J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(3): 1.

[20] WANG Yuke, YU Bowen, WAN Yukuai, *et al*. Experimental investigation and numerical verification on diffusion of permeable polymers in sandy soils with considering grouting parameters [J]. International Journal of Civil Engineering, 2023, 21: 617.

[21] 郭景琢, 郑刚, 赵林嵩, 等. 多排孔注浆引起土体变形与孔压规律试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 896.
GUO Jingzhuo, ZHENG Gang, ZHAO Linsong, *et al*. Experimental study of soil deformation and pore pressure caused by multi-row grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(3): 898.