

## 临近既有铁路增建新线地基处理施工影响比较分析

何 晓, 王伟志, 徐永福, 王 虎, 杨元治, 杨炜林, 敖江忠, 鲜 谊, 倪顺天, 叶华洋

## Comparison analysis of the impact of soft ground improvement construction on existing railways near newly constructed lines

HE Xiao, WANG Weizhi, XU Yongfu, WANG Hu, YANG Yuanzhi, YANG Weilin, AO Jiangzhong, XIAN Yi, NI Shuntian, and YE Huayang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211054>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 盾构地铁隧道穿越既有铁路桥的沉降分析

An analysis of the settlement of a shield tunnel passing under the operating railway bridge

于德海, 舒娇娇, 秦凯凯 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 148-152

#### 砂土地基冲击碾压加固效果影响因素的试验研究

Laboratory investigation on influencing factors of improvement effect of rolling dynamic compaction on sand

陈忠清, 朱文韬, 吕越, 黄曼, 李明东 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 128-134

#### 软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响

Influences of double-track shield tunnel construction on settlements of adjacent ground and buildings in a soft soil area

潘涛 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 101-108

#### 竹节桩复合地基沉桩施工超孔隙水压力研究

A study of the excess pore water pressure during pile-sinking construction of nodular pile composite foundation

叶俊能, 周晔, 朱瑶宏, 刘干斌 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 103-103

#### 粉煤灰基地聚物加固土的强度及抗冻融性能试验研究

Laboratory investigation on the strength and freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer stabilized soil

陈忠清, 朱泽威, 吕越 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 100-108

#### 循环荷载下水泥土桩复合体动力参数试验研究

An experimental study of dynamic parameters of unit cell of deep mixed column-reinforced soft clay under dynamic loading

叶观宝, 秦粮凯, 张振, 郑文强, 陈勇 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 48-56



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211054

何晓, 王伟志, 徐永福, 等. 临近既有铁路增建新线地基处理施工影响比较分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 111-122.  
HE Xiao, WANG Weizhi, XU Yongfu, et al. Comparison analysis of the impact of soft ground improvement construction on existing railways near newly constructed lines [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 111-122.

## 临近既有铁路增建新线地基处理施工影响比较分析

何晓<sup>1</sup>, 王伟志<sup>2</sup>, 徐永福<sup>3</sup>, 王虎<sup>4</sup>, 杨元治<sup>1</sup>, 杨炜林<sup>1</sup>, 敖江忠<sup>1</sup>, 鲜谊<sup>5</sup>, 倪顺天<sup>2</sup>, 叶华洋<sup>4</sup>  
(1. 萧甬铁路有限责任公司, 浙江宁波 315010; 2. 上海铁路枢纽建设指挥部, 上海 200071;  
3. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240; 4. 南京铁路枢纽工程建设指挥部, 江苏  
南京 210031; 5. 中铁二局集团有限公司, 四川成都 610031)

**摘要:** 我国东南沿海一带, 铁路既有线的建设时代久远、铁路路基建设标准低, 地基土质条件差, 受增建新线铁路路基的地基处理施工影响明显。对地基处理施工进行现场监测, 选取施工影响小的地基处理方法对保障既有铁路运营安全至关重要。根据超孔隙水压力、地表位移和深层位移的现场施工监测数据, 分析地基处理施工影响范围和程度, 得到以下结论: (1) 施工影响由大到小的排序为高压旋喷桩(管桩)>水泥搅拌桩>全方位高压喷射(MJS)桩>布袋桩; (2) 水泥搅拌桩施工影响范围在 5 m 左右, 高压旋喷桩施工影响范围高达 10 m, 布袋桩施工影响范围大约为 3 m, MJS 桩施工影响范围在 4 m 左右。对比高压旋喷桩、管桩、布袋桩和 MJS 桩与搅拌桩施工影响大小, 优化临近既有铁路增建新线的地基处理方案, 可以有效控制增建新线地基处理对既有铁路的扰动影响, 确保既有铁路安全。

**关键词:** 铁路; 地基处理; 施工影响; 水泥搅拌桩; 高压旋喷桩; 布袋桩; 全方位高压喷射桩

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)01-0111-12

## Comparison analysis of the impact of soft ground improvement construction on existing railways near newly constructed lines

HE Xiao<sup>1</sup>, WANG Weizhi<sup>2</sup>, XU Yongfu<sup>3</sup>, WANG Hu<sup>4</sup>, YANG Yuanzhi<sup>1</sup>, YANG Weilin<sup>1</sup>,  
AO Jiangzhong<sup>1</sup>, XIAN Yi<sup>5</sup>, NI Shuntian<sup>2</sup>, YE Huayang<sup>4</sup>

(1. Xiaoyong Railway Co. Ltd., Ningbo, Zhejiang 315010, China; 2. Shanghai Railway Key Project Construction Headquarters, Shanghai 200071, China; 3. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Construction Headquarter of Nanjing Railway Key Project, Nanjing, Jiangsu 210031, China; 5. China Railway Erju Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** In the southeast coastal area of China, existing railway lines, constructed long ago with low construction standards for railway subgrades, face significant impacts from the construction of soft ground improvement for newly built railway lines. Through on-site monitoring of foundation treatment construction, it is crucial to select the soft ground improvement method with minimal construction impact to ensure the operation safety of the existing railway. Based on the on-site monitoring data of the excess pore water pressure, surface displacement, and deep displacement in the construction of soft ground improvement, the study assesses the extent and magnitude of

收稿日期: 2022-11-17; 修订日期: 2023-01-15 投稿网址: [www.swdgcgz.com](http://www.swdgcgz.com)

基金项目: 上海铁路局集团有限公司科研项目(2020150; 2022173)

第一作者: 何晓(1965—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事铁路建设管理工作。E-mail: [2518646021@qq.com](mailto:2518646021@qq.com)

通讯作者: 徐永福(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事非饱和土力学和特殊土地基处理科研与教学工作。E-mail: [yongfuxu@sju.edu.cn](mailto:yongfuxu@sju.edu.cn)

construction impact. The key findings include: (1) Ranking of construction impact magnitude: High-pressure jet grouting column (pipe pile) > deep cement mixing column > MJS column > geosynthetic reinforced column; (2) Construction impact range: deep cement mixing column, high-pressure jet grouting column, geosynthetic reinforced column and MJS column are about 5 m, 10 m, 3 m and 4 m, respectively. The construction disturbance of high-pressure jet grouting pile, pipe pile, polymer bag grouting pile and deep cement mixing column are compared based on the differences of excess pore water pressure, surface displacement, deep displacement and construction disturbance range. It is provided a basis for comparison and selection of schemes for soft ground improvement of new railway lines adjacent to existing railways. This optimization effectively controls the construction disturbance of the soft ground treatment of the new line and ensures the safety of the existing railway.

**Keywords:** railway line; soft ground improvement; construction disturbance; deep cement mixing column; high-pressure jet grouting column; geosynthetic reinforced column; MJS column

近年来,我国高速铁路发展进入快车道。铁路增建新线,主要是解决既有线输送能力不足的问题,主要采取沿既有线增建新线的措施,迅速有效地提高运输能力<sup>[1-3]</sup>。目前国内软土地区铁路并行增建新线主要分布在东南地区,如萧甬线、宣杭线、上海南站等。上海、宁波等发达城市中建筑物分布密集,新建工程影响了既有建筑的安全。因此,研究增建新线对既有铁路的影响,对于保证增建新线的建设质量和既有线的安全运营都具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。

尽管对临近既有线增建铁路软土地基处理施工做了非常严格的规定,但增建铁路软土地基处理施工的影响对既有线的危害还是需要高度重视<sup>[7-12]</sup>。武孝天等<sup>[13]</sup>通过现场监测搅拌桩施工引起的超孔隙水压力、土压力和水平位移,揭示搅拌桩施工影响机理,提出定量表示搅拌桩施工影响的方法。邓永峰等<sup>[14]</sup>根据水泥搅拌桩施工的现场测试结果,评价了水泥搅拌桩的施工影响。魏海涛等<sup>[15]</sup>探讨了水泥搅拌桩和回填土 2 种施工顺序的处理效果,采用“先土后桩”顺序的施工期沉降大于“先桩后土”,但工后沉降大大减小。石舒<sup>[16]</sup>针对地铁下穿高铁高架桥工程,分析了钻孔桩和旋喷桩施工引起既有高架桥桩基变形,钻孔桩施工引起桩基的沉降为 0.94 mm、水平位移小,旋喷桩施工引起桩基水平位移和沉降分别为 0.5 mm 和 0.6 mm,控制施工速度能减小对桩基的影响。卞荣等<sup>[17]</sup>采用数值方法对预制桩(桩径为  $D_p$ )静压施工的影响范围进行分区,桩长小于 2 倍隧道外径( $D_t$ )时,强影响区域范围为  $\max(1.5D_t, 4.5D_p)$ ,弱影响区域范围为  $\max(4D_t, 8D_p)$ ;桩长介于  $2D_t \sim 6D_t$  时,强影响区域范围为  $\max(D_t, 3D_p)$ ,弱影响区域范围为  $\max(3D_t, 6D_p)$ 。

当前,对地基处理施工影响程度和范围有许多研

究成果,但对不同地基处理施工的影响缺少比较,无法选择施工影响小的地基处理方法。鉴于此,本文依托宁波增建三四线和上海南站增建新线铁路软土地基处理施工,首先分析水泥搅拌桩施工影响特性,根据水泥搅拌桩施工过程中的超孔隙水压力、土压力和位移的现场监测结果,评价水泥搅拌桩施工影响;其次比较高压旋喷桩、MJS 桩、管桩、布袋桩与水泥搅拌桩施工影响的大小,梳理软土地基处理施工影响的排序,为临近既有线增建铁路软土地基处理方案选取提出理论支撑和技术保障。

## 1 地基处理施工监测方法

宁波枢纽庄桥至宁波段增建三四线工程自杭甬铁路庄桥站引出,在既有线西侧距既有线上行线(Ⅱ线)25 m 处新建双线桥跨过余姚江,后以 9.5 m 线间距平行既有线上行线(Ⅱ线)前行,至宁波站东端。由于软土地层的特殊工程性质,在软土中工程建设存在很大风险,对工程设计技术和施工技术提出了较高的要求。沪杭铁路上海南站至春申增建三四线是新建上海至杭州客运专线的联络线工程,构成了上海南站的咽喉要道,与既有沪春线、地铁 1 号线并行,施工场地狭小。

铁路既有线路基变形要求很高,铁路路基变形监测的预警机制为<sup>[18-19]</sup>:高铁无砟轨道路基和桥梁桩基沉降或横向位移小于 1 mm;有砟轨道铁路路基单次月位移小于 2 mm、3 个月累计位移小于 5 mm、累计位移小于 10 mm、位移变化速率小于 2 mm/d(施工时间大于 3 d 后按最近 3 d 平均值计算)。临近铁路既有软土地基处理施工有严格要求<sup>[18-19]</sup>。对于管桩施工,当桩中心与既有线中心距离小于 30 m 时,应在既

有线与紧靠桩之间预先设置应力释放孔。先施工最靠近既有线的3~5排桩,按照与既有线的距离由近及远逐排跳桩施打,两台桩机间施工时沿铁路方向应保持30 m及以上距离。前5排的沉桩速度不应大于15 m/h(软土地区沉桩速度不应大于10 m/h),其它桩距路堤坡脚在30 m内管桩沉桩速度不应大于20 m/h(软土地区沉桩速度不应大于15 m/h)。对于高压旋喷桩施工,先施工最靠近既有线的3~5排桩,按照由近及远逐排跳桩施工,线路同侧的两台高压旋喷桩的距离应不小于30 m。

宁波增建三四线和上海南站增建新线铁路软土地基处理方法主要有水泥搅拌桩、高压旋喷桩、管桩、布袋桩和全方位高压喷射(metro jet system, MJS)桩,为比较不同地基处理方法的施工影响,现场对地基处理施工引起的位移、应力进行监测。

### 1.1 水泥搅拌桩

宁波增建三四线软土地基处理以水泥搅拌桩为主要方法。选取现场施工监测的水泥搅拌桩施工段落位于K306+615~655,主要土质为粉质黏土,软塑-流塑。搅拌桩的桩径为 $\Phi 0.5$  m,间距为1 m,桩长为12 m。采用P.042.5普通硅酸盐水泥,设计水灰比为0.8:1,每延米水泥、土和水的质量比为73:365:58,水泥掺量20%。施工顺序为由试验段两端向中间施工,见图1(a)。水泥搅拌桩施工影响的现场监测内容主要为:超孔隙水压力计、土压力、深层位移和地表位移,监测点布置如图1(a)所示。地表监测点选用Leica标准精密测距棱镜,采用全自动全站仪测量地表位移。通过现场埋设测斜管监测深层位移,土压力和超孔隙水压力通过现场埋设压力传感器测量。

### 1.2 高压旋喷桩

宁波增建三四线软土地基处理进行了高压旋喷桩施工试验,目的就是了解高压旋喷桩的施工影响范围和影响程度,比较不同直径、不同桩间距高压旋喷桩的施工影响,测点布置如图1(b)所示。

### 1.3 布袋桩

布袋桩直接向预先埋设好的无纺土工布袋内注浆,形成袋装柱体。由于预先埋设的布袋形成人工注浆通道,所以注浆压力小,一般小于0.6 MPa,比高压旋喷桩的注浆压力(20 MPa)小,因此布袋桩的施工影响小。

宁波增建三四线的布袋桩工艺性试验段选取K307+600~650段线路右侧。布袋桩的桩径为0.4 m,桩长为25~30 m,桩间距为1.3 m。注浆压力为0.4~

0.5 MPa,浆液的水泥、粉煤灰和水的质量比为639:426:586,水胶比为0.55,进浆速度为55 L/min。

### 1.4 MJS桩

MJS桩工法采用多孔管钻进,多孔管中间有一个60 mm的泥浆抽取管,在倒吸水和倒吸空气适配器的作用下,能将地下的废泥浆强制抽出。钻头上装有地内压力感应器和排泥阀门,自由控制排泥阀门大小,当地内压力显示不正常时,调整排泥阀门的大小可顺利排出泥浆,使地内压力正常。MJS工法分为2个阶段:(1)削孔阶段,削孔时将1.5 m的钻杆和前端装置连接,顶出多孔管,至设计深度;(2)摇摆喷射阶段,通过安装在钻头底部侧面的特殊喷嘴,用高压泵以40 MPa左右的压力将硬化材料及空气从喷嘴喷射出去,同时将多孔管抽回,浆液凝固后,在土中形成各种形状的加固体。

宁波增建三四线MJS桩基用于加固基坑底,MJS桩工艺性试验段选取既有铁路余姚江特大桥27#墩和28#台东侧,对应里程K308+630~650,距离杭深下行线32 m处。试验段MJS桩的桩长13.6 m、桩径2.4 m、间距2.0 m,正方形布置,注浆从地表下5.6 m开始,注浆压力为40 MPa。三根MJS桩的水泥掺量分别为40%(每米水泥用量3 370 kg)、45%(每米水泥用量3 792 kg)、50%(每米水泥用量4 213 kg)。为了分析MJS桩施工对既有铁路路基的影响布置测点,如图1(b)所示,监测MJS桩的施工影响。

## 2 水泥搅拌桩的施工影响

### 2.1 地表位移

水泥搅拌桩施工影响监测时间为2021年5月3日至8月16日,搅拌桩施工引起沿路基纵向和横向的地表位移随时间的变化见图2。第一行(测点1-1)和第三行(测点1-3)测点距水泥搅拌桩的距离相同,测点处的地表变形( $s$ )和水平位移( $s_h$ )基本相同。1-3的变形( $s$ )一开始是负值,表明地表发生隆起。中间测点2-2相对于两侧测点监测到的地表变形和水平位移相对大一些,这是由累积效应引起的,搅拌桩的施工顺序由1→2和由3→2,施工影响的位移由1→2和由3→2叠加累积,导致测点2-2的地表变形和水平位移增加,因此施工顺序决定了水泥搅拌桩施工影响的大小。选取中间一行测点比较沿路基横向的地表位移,如图2(b)所示。离水泥搅拌桩施工距离越近(1.5 m)的测点,搅拌桩施工引起的地表变形和水平位移越大;离搅拌桩施工距离最远(10 m)的测点,搅拌桩施

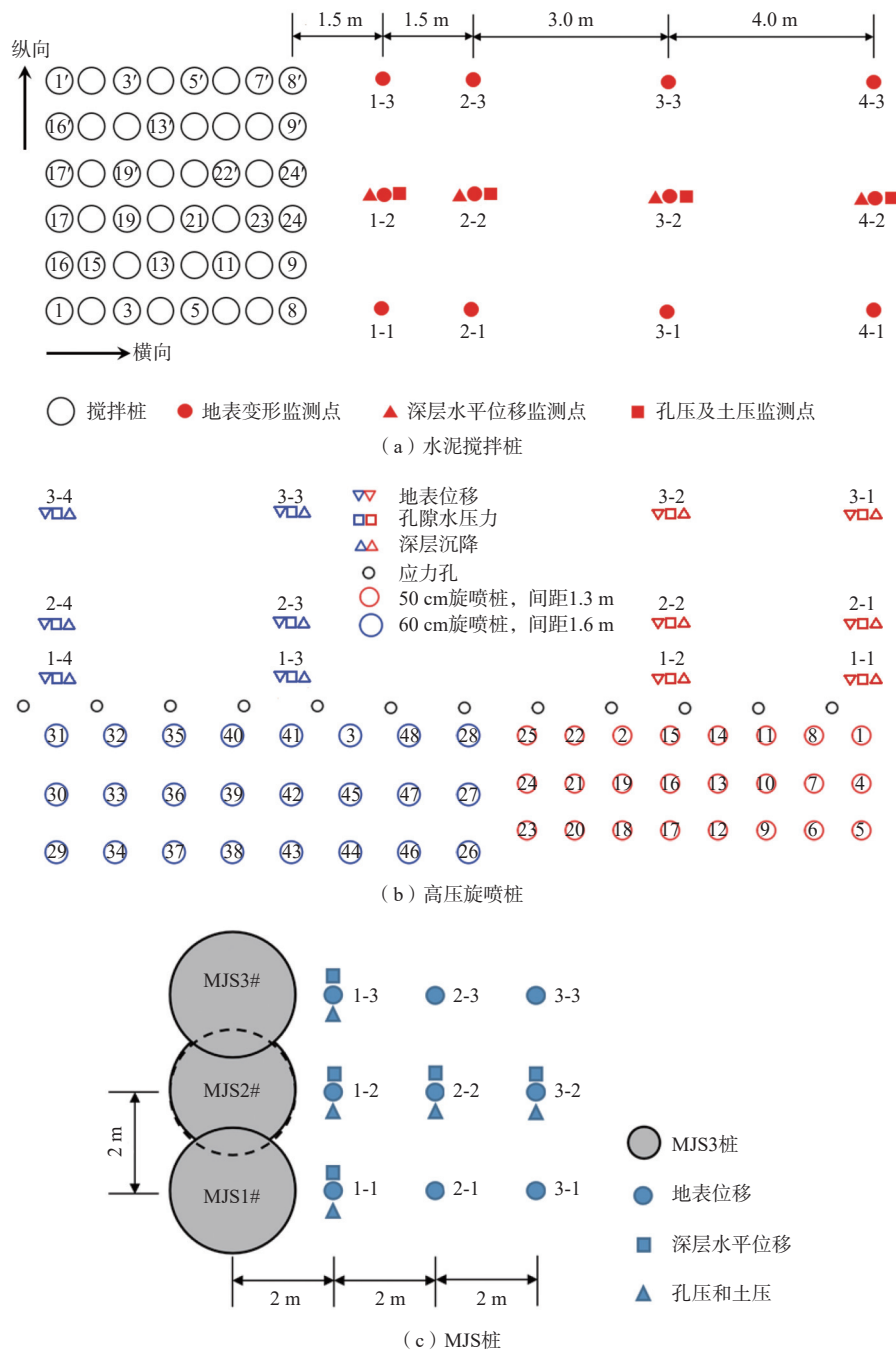


图 1 桩体施工和监测点布置图  
 Fig. 1 Layout of monitoring points for DCM, HPJG and MJS

工引起的地表变形和水平位移最小。

地表变形( $s$ )和水平位移( $s_h$ )与水泥搅拌桩的距离( $x$ )的相关关系如图 2(c)所示。随着距离增加,地表变形减小。地表变形和水平位移与距离呈幂函数相关。根据铁路路基累积位移小于 10 mm 的要求<sup>[18-19]</sup>,水泥搅拌桩施工影响范围在 5 m 左右。

### 2.2 深层水平位移

在深度小于 5 m 的位置,土体的水平位移比较

大。如图 3(a)所示,2021 年 8 月 8 日,搅拌桩施工与测斜孔距离最小,此时土体的水平位移快速增加,表现为 8 月 7 日的深层水平位移与 8 月 8 日的深层水平位移相差比较大。2021 年 8 月 14 日,随着离水泥搅拌桩施工位置距离的增加,第二行不同位置处的深层水平位移减小,见 3(b)。由图 3(c)可知,深层水平位移与距离的关系近似地呈幂函数关系。因此,与地表位移类似,土体深层水平位移与距离呈幂函数相关。

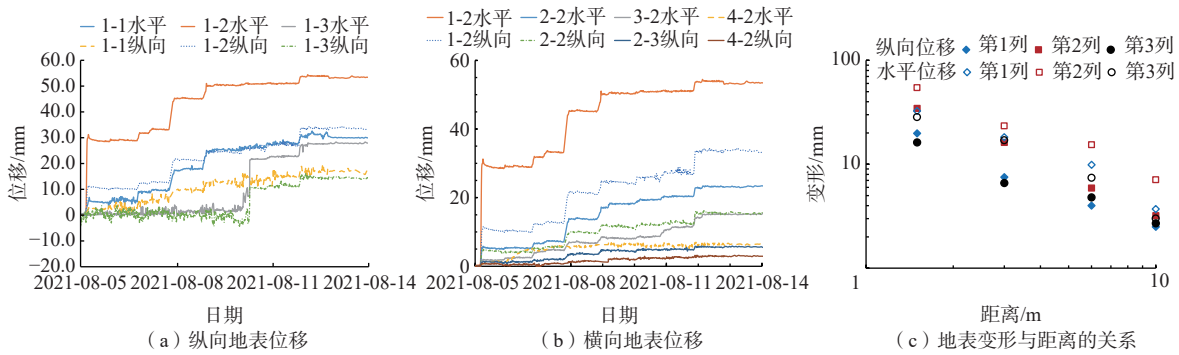


图 2 水泥搅拌桩沿路基监测纵向和横向的地表位移及与距离的关系

Fig. 2 Surface displacement along longitudinal and transversal subgrade of DCM and the relationship between surface displacement and distance caused by DCM

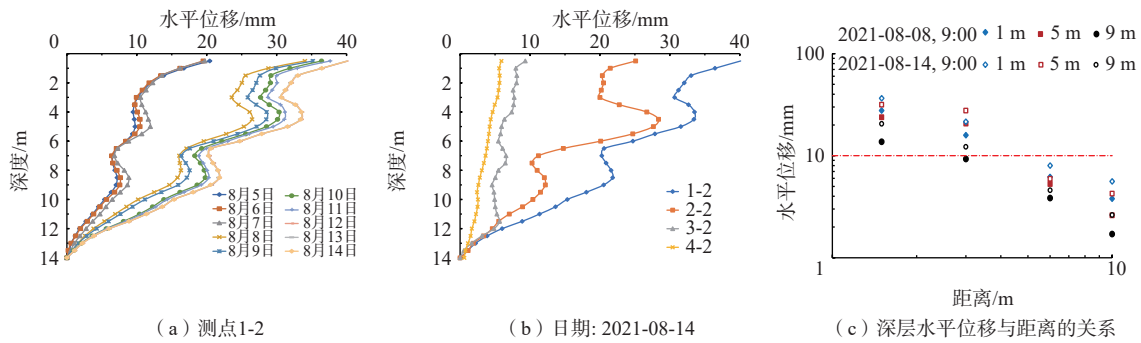


图 3 搅拌桩施工引起的深层水平位移及其与距离的关系

Fig. 3 Deep horizontal displacement caused by DCM construction and Relationship between deep horizontal displacement and distance caused by DCM

铁路路基累积位移按 10 mm 控制<sup>[18-19]</sup>,水泥搅拌桩施工影响范围在 5 m 左右。

### 2.3 超孔隙水压力和土压力

随着离搅拌桩施工点的距离减小,土体的土压力和超孔隙水压力快速增加,到达峰值压力后,慢慢减小,见图 4。与变形类似,随着水泥搅拌桩施工数量的增加,土压力和超孔隙水压力具有明显的累积效应。

水泥搅拌桩施工引起的土压力( $p$ )与超孔隙水压力( $\Delta u_w$ )的关系比较见图 5。水泥搅拌桩施工引起的超孔隙水压力与土压力基本相等,即超孔隙水压力与土压力同步增加,同时到达峰值,两者数值基本相等。超孔隙水压力与土压力数值相同,表明水泥搅拌桩施工过程中,测点位置处的土体受施工扰动影响,发生触变,呈泥浆状,导致超孔隙水压力与土压力数值相同。

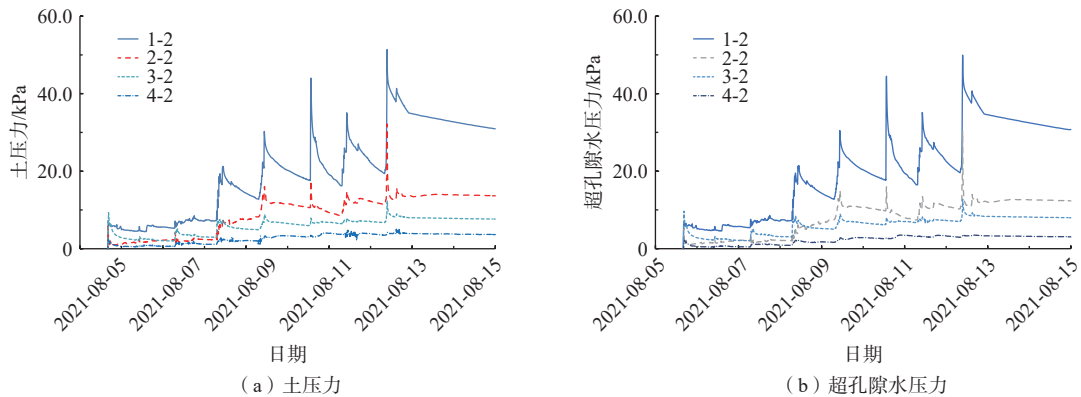


图 4 搅拌桩施工引起 8 m 深处的土压力和超孔隙水压力

Fig. 4 Earth pressure and excess pore water pressure at 8 m depth caused by DCM

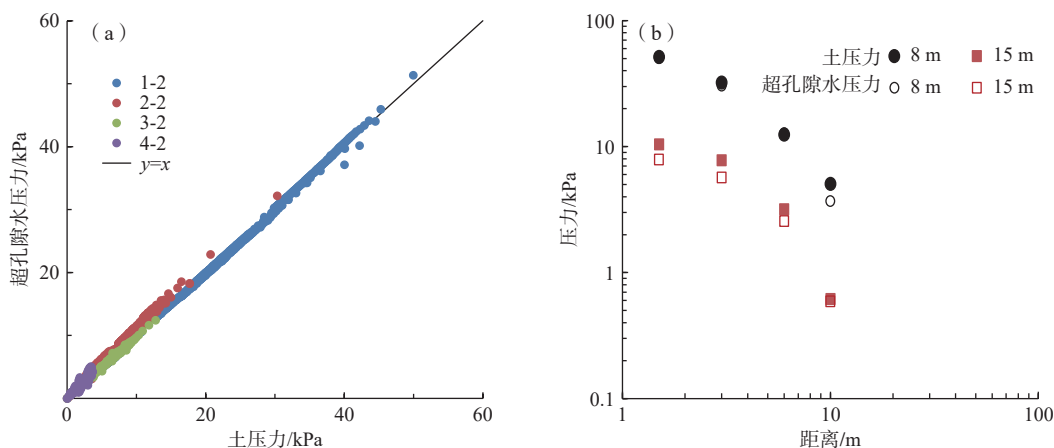


图 5 搅拌桩施工引起超孔隙水压力与土压力、距离的关系

Fig. 5 Relationship between earth pressure and distance vs. excess pore water pressure caused by DCM

水泥搅拌桩施工引起的土压力与超孔隙水压力与距离的相关关系见图 5(b)。土压力与超孔隙水压力与距离呈幂函数相关关系,与文献 [20] 的理论计算结果一致。

### 3 施工影响比较

#### 3.1 高压旋喷桩和管桩比较

##### (1) 地表变形

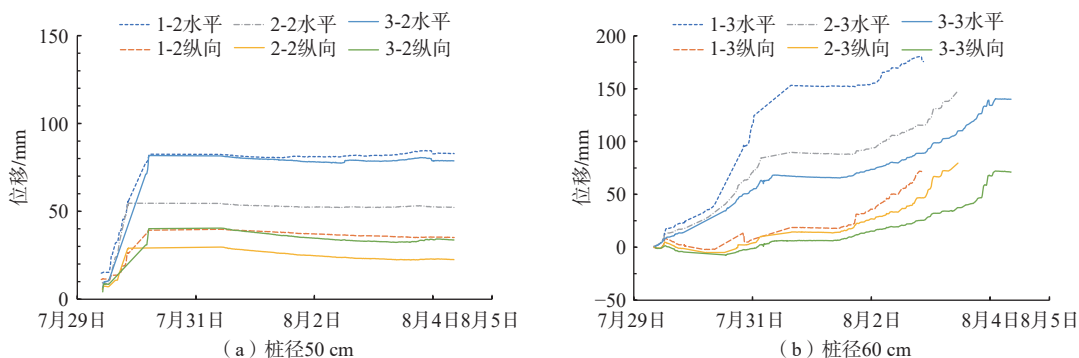


图 6 高压旋喷桩施工引起的地表位移随时间的发展规律

Fig. 6 Development pattern of surface displacement caused by HPJG over time

在靠近铁路路基一侧,离高压旋喷桩施工边缘 1.5 m 处布设了应力释放孔;在远离铁路路基一侧,没有布设应力释放孔。现场监测数据表明(图 7),压力释放孔对减小高压旋喷桩施工影响的效果不明显。高压旋喷桩施工引起地表位移和水平位移与距离近似地表示为幂函数相关关系。铁路路基累积位移按照 10 mm 控制 [18-19],高压旋喷桩施工影响范围超过 10 mm。因此,从施工影响范围看,高压旋喷桩施工影响比水泥搅拌桩施工影响范围大。

选取紧邻路段的高压旋喷桩和水泥搅拌桩进行

图 6 分别表示不同桩径高压旋喷桩施工引起 2、3 列测点的水平位移和纵向位移。由于喷浆压力沿水平方向,因此高压旋喷桩施工引起的地表水平位移大于地表纵向位移。对比图 6(b)与图 6(a),发现直径(60 cm)大的高压搅拌桩施工引起的土体位移大,也就是说,直径(60 cm)大的高压旋喷桩的施工影响比直径(50 cm)小的高压旋喷桩的施工影响大,原因是直径大的旋喷桩的喷射压力大,施工影响也大。

施工监测,水泥搅拌桩施工与高压旋喷桩施工引起的地表变形和水平位移测点离施工点的距离都是 1.5 m,在水泥搅拌桩施工和高压旋喷桩施工路段都设置了应力释放孔。水泥搅拌桩和高压旋喷桩施工产生的地表水平位移都比地表变形大,高压旋喷桩施工比水泥搅拌桩施工产生的地表变形和水平位移大(图 8)。因此,根据施工引起的地表位移监测数据,水泥搅拌桩施工影响比高压旋喷桩小。

##### (2) 超孔隙水压力

选取深度 8 m 处的孔隙水压力分析高压旋喷桩的

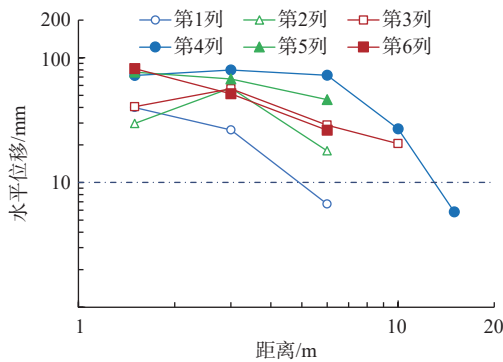
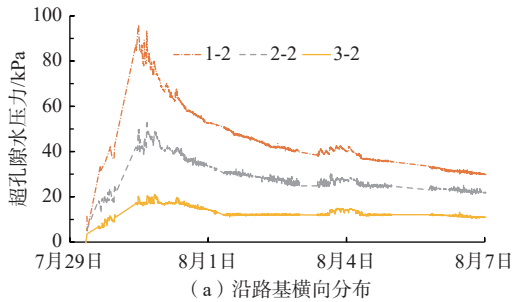


图 7 旋喷桩施工引起的地表位移与距离的关系

Fig. 7 Relationship between surface displacement and distance caused by HPJG

施工影响, 图 9(a)是高压旋喷桩施工产生的超孔隙水压力沿路基横向的分布, 高压旋喷桩施工引起的超孔隙水压力随距离增加而减小, 与土体地表位移监测结果一致; 图 9(b)是高压旋喷桩施工产生的超孔隙水压力沿路基纵向的分布, 高压旋喷桩施工顺序分别是由



(a) 沿路基横向分布

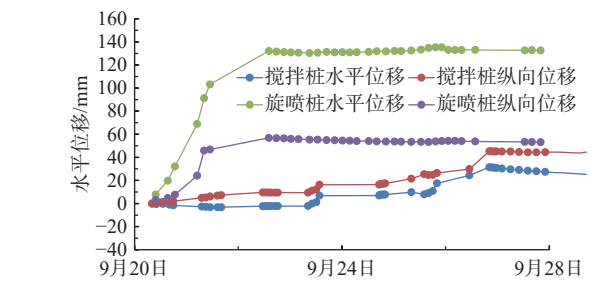
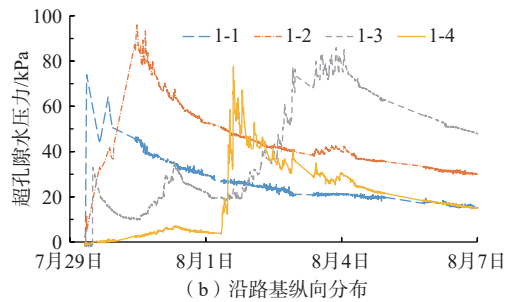


图 8 旋喷桩与搅拌桩施工引起的地表位移比较

Fig. 8 Comparisons of surface displacement caused by HPJG and DCM

第 1 列向第 2 列和由第 4 列向第 3 列, 所以 1-1 点的超孔隙水压力达到峰值的时间在 1-2 点之前, 1-4 点的超孔隙水压力在 1-3 点之前达到峰值; 同时, 1-2 点超孔隙水压力峰值大于 1-1 点超孔隙水压力峰值, 同样 1-3 点超孔隙水压力峰值大于 1-4 点超孔隙水压力峰值。可见, 高压旋喷桩施工产生的超孔隙水压力具有明显的累积效应。



(b) 沿路基纵向分布

图 9 高压旋喷桩施工产生的超孔隙水压力

Fig. 9 Excess pore water pressure caused by HPJG construction

为了比较水泥搅拌桩施工和高压旋喷桩施工引起的超孔隙水压力大小, 剔除累积效应引起的孔隙水压力, 比较纯粹由水泥搅拌桩施工和高压旋喷桩施工引起的超孔隙水压力。图 10(a)(b)分别是 4 m 和 9 m 深度处的超孔隙水压力。由水泥搅拌桩施工引起的超孔隙水压力基本上都比高压旋喷桩施工引起的孔隙水小, 因此水泥搅拌桩的施工影响比高压旋喷桩的施工影响小。

图 10(c)比较了水泥搅拌桩与管桩施工引起的超孔隙水压力, 水泥搅拌桩施工产生的超孔隙水压力普遍都比管桩施工产生的超孔隙水压力小。图 10(d)比较了高压旋喷桩与管桩施工引起的超孔隙水压力, 高压旋喷桩施工产生的超孔隙水压力与管桩施工产生的超孔隙水压力基本相同。因此, 根据施工引起的超孔隙水压力的大小, 管桩的施工影响比水泥搅拌桩

小, 与高压旋喷桩的施工影响基本相同。

### 3.2 与布袋桩比较

布袋桩施工引起的地表位移都小于 10 mm(图 11), 均小于铁路路基累积位移的控制标准。因此采用布袋桩进行软土地基处理, 不会对既有线铁路路基产生不良影响。

布袋桩施工引起的地表变形和水平位移最小, 高压旋喷桩施工引起的地表变形和水平位移最大, 搅拌桩施工引起的地表变形和水平位移介于两者之间(图 12)。因此, 根据地表位移的大小, 布袋桩、水泥搅拌桩和高压旋喷桩的施工影响顺序为: 布袋桩<搅拌桩<旋喷桩。

布袋桩施工产生超孔隙水压力最小, 高压旋喷桩施工产生超孔隙水压力最大(图 13)。图 13 中看出, 由于布袋桩与搅拌桩施工影响小, 两者施工产生的超



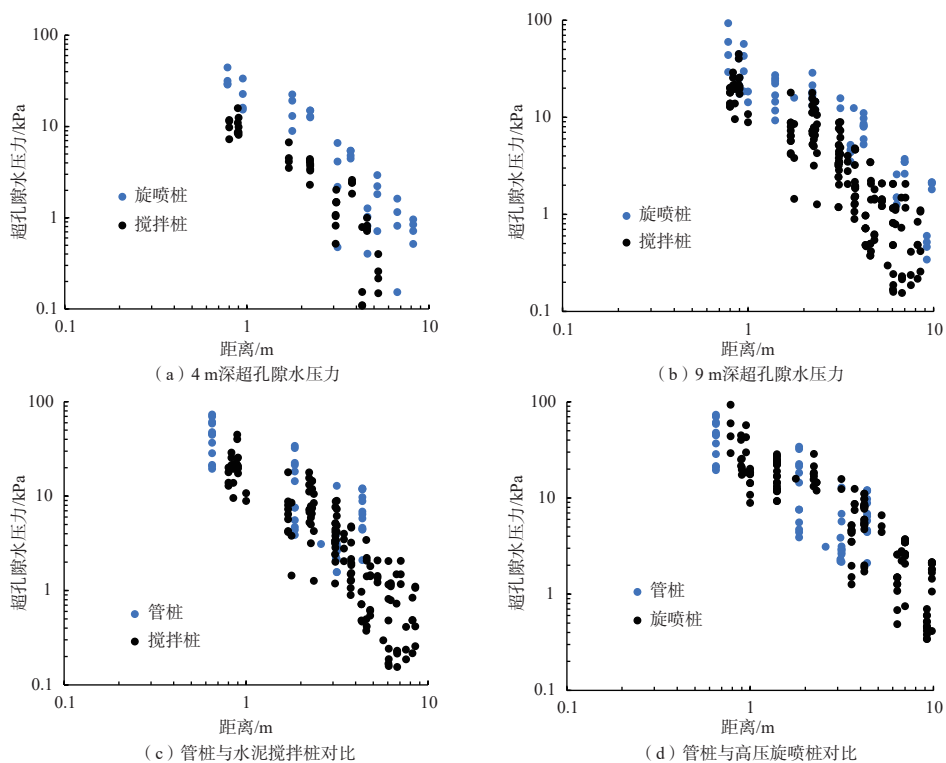


图 10 旋喷桩与搅拌桩施工产生的超孔隙水压力和管桩与旋喷桩、搅拌桩施工产生的超孔隙水压力对比

Fig. 10 Comparisons of excess pore water pressure caused by HPJG and DCM Comparisons of excess pore water pressure caused by pipe pile and HPJG, DCM constructions

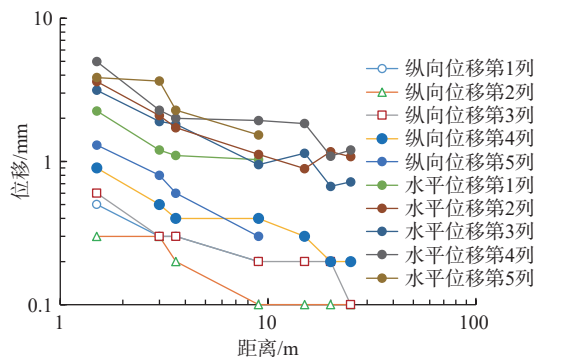


图 11 Surface displacement caused by GRC construction

孔隙水压力随深度增加越来越小, 表现为随深度增加而减小; 而高压旋喷桩正好相反, 由于施工影响大, 表现为随深度增加而增加。因此, 根据施工产生的超孔隙水压力的大小, 布袋桩、水泥搅拌桩和高压旋喷桩的施工影响顺序为: 布袋桩 < 搅拌桩 < 高压旋喷桩, 临近既有线增建铁路的地基处理采用布袋桩是安全的措施。

### 3.3 与 MJS 桩比较

#### (1) 位移

如图 14(a) 所示, 与 MJS 桩等距离的 3 个测点, 1-

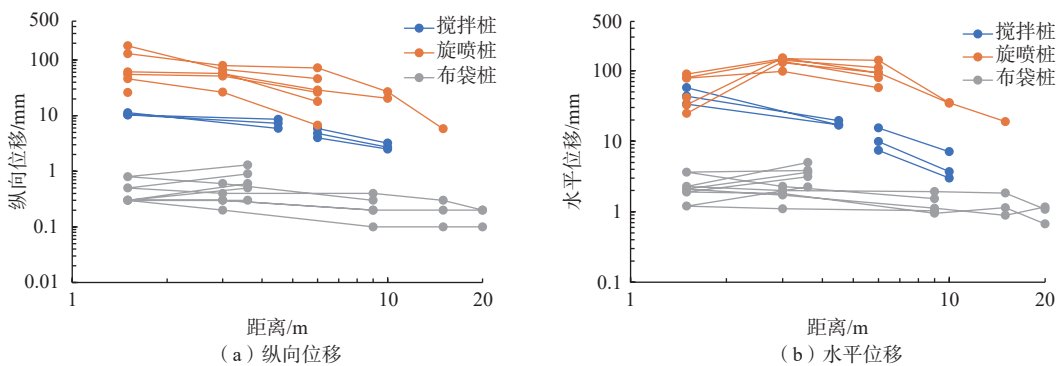


图 12 布袋桩与搅拌桩和高压旋喷桩施工引起的地表位移比较

Fig. 12 Comparison of surface displacement caused by GRC and DCM, HPJG construction

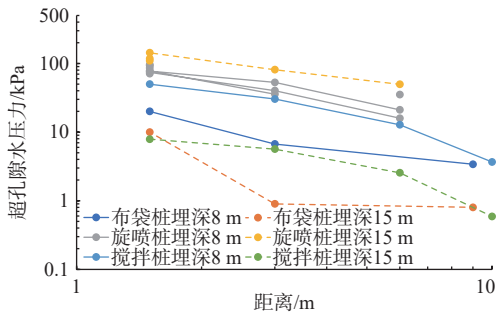
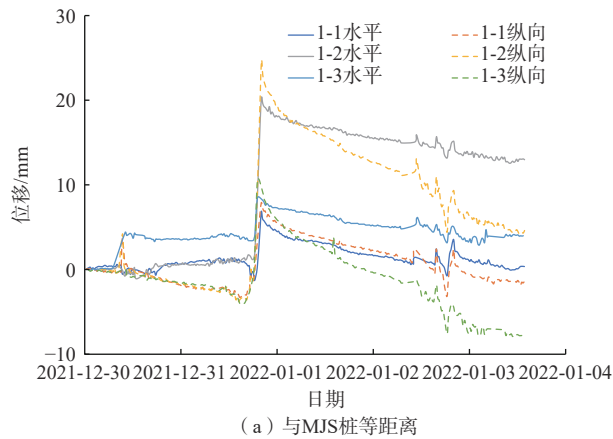
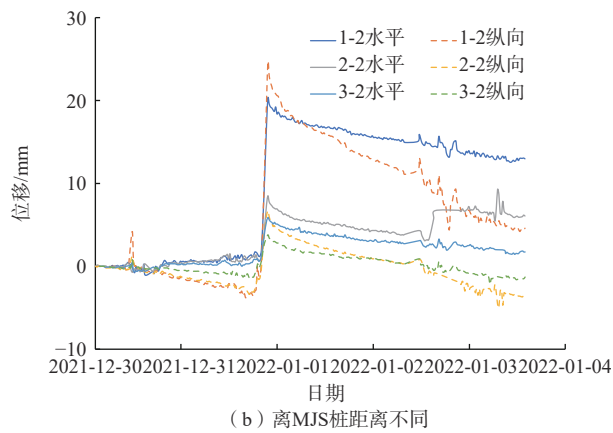


图 13 布袋桩与搅拌桩和旋喷桩施工产生的超孔隙水压力比较  
Fig. 13 Comparison of excess pore pressure caused by GRC, DCM and HPJG constructions



(a) 与MJS桩等距离



(b) 离MJS桩距离不同

图 14 MJS 桩施工引起的地表变形

Fig. 14 Surface displacement caused by MJS construction

1、1-2 和 1-3 分别监测 MJS1#、MJS2#和 MJS3#的施工影响, 测点 1-1 和 1-3 的地表变形和水平位移基本相同, 在其他参数相同的条件下水泥掺量不同的 MJS 桩的施工影响变化不大。测点 1-2 的地表变形和水平位移比两侧测点 1-1 和 1-3 的地表变形和水平位移大, 原因是由施工影响叠加引起的。如图 14(b)所示, 离 MJS 桩距离不同的测点, 地表变形和水平位移随距离

增大而减小, 在 4 m 以外的 2-2 和 2-3 点的地表变形和水平位移数值差不多, 表明 MJS 桩的施工影响范围大约为 4 m。在曲线的前面部分与削孔阶段对应, 表现为曲线斜率平缓, 地表变形和水平位移小; 在浆液摇摆喷射阶段, 地表变形和水平位移迅速增加, 然后慢慢减小。

从图 15 中看出, MJS 桩与水泥搅拌桩施工引起的地表变形和水平位移基本相同, MJS 桩施工引起的地表变形和水平位移比布袋桩大。因此, 从施工影响范围和地表位移大小看, MJS 桩与水泥搅拌桩的施工影响基本一样, 都比布袋桩的施工影响大。

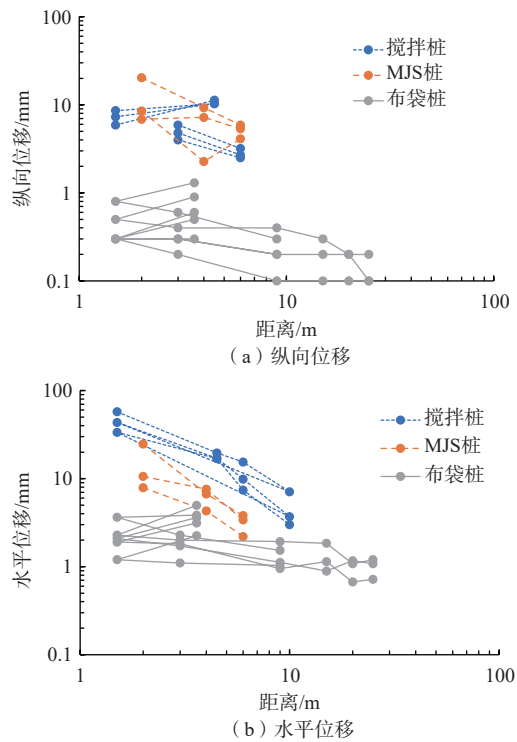


图 15 MJS 桩与搅拌桩和布袋桩施工引起的地表位移比较  
Fig. 15 Comparisons of surface displacement caused by MJS, DCM and GRC constructions

与地表变形和水平位移的变化规律一样, 与 MJS 桩距离相同的测点的水平位移基本相同, 点 1-2 的水平位移因施工影响叠加而增大, 见图 16(a); 随着与 MJS 桩的距离增加, 水平位移减小, 见图 16(b)。与削孔阶段对应, 在 5.6 m 以上的水平位移比较小; 在 5.6 m 以下, 随着高压浆液摇摆喷射, 水平位移增加很快, 随着深度增加, 水平位移迅速减小。MJS 桩施工引起的深层水平位移对比见图 17。施工顺序是由 MJS1#向 MJS3#, MJS1#施工引起不同点的深层水平位移最小, MJS2#桩施工引起的水平位移最大。

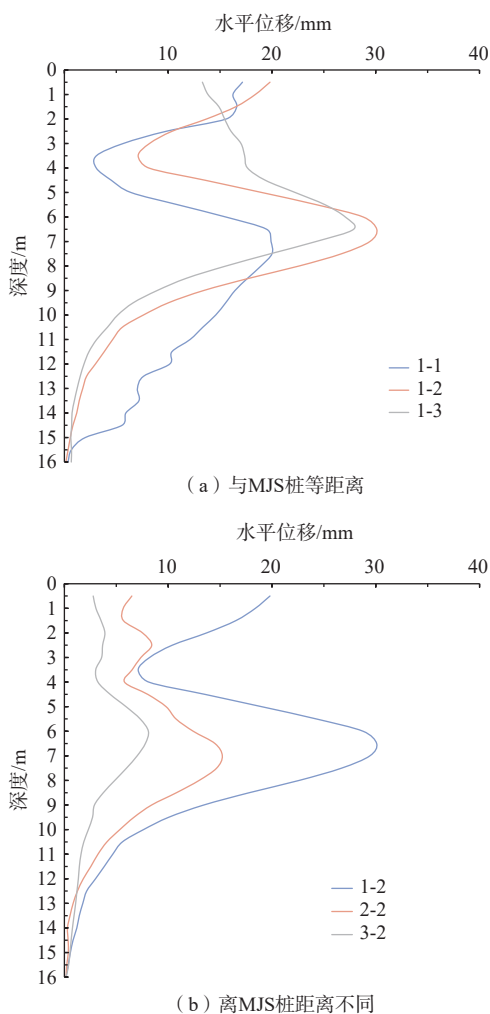


图 16 MJS 桩施工引起的深层水平位移

Fig. 16 Deep horizontal displacement caused by MJS construction

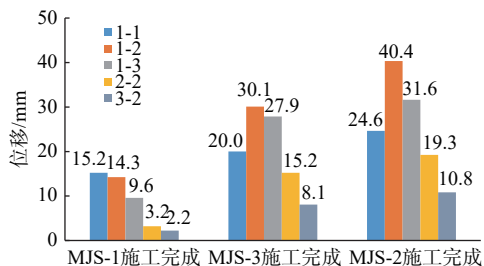


图 17 MJS 桩施工引起的深层水平位移比较

Fig. 17 Comparison of deep horizontal displacement of MJS

(2) 超孔隙水压力

MJS 桩施工产生的超孔隙水压力的测点埋深为 10 m。与 MJS 桩距离相同的测点的超孔隙水压力基本相同, 点 1-3 的超孔隙水压力因施工影响叠加而增大, 见图 18(a); 随着与 MJS 桩的距离增加, 超孔隙水压力减小, 见图 18(b)。在削孔阶段, 产生的超孔隙水压力较小; 在高压浆液摇摆喷射阶段, 超孔隙水压力

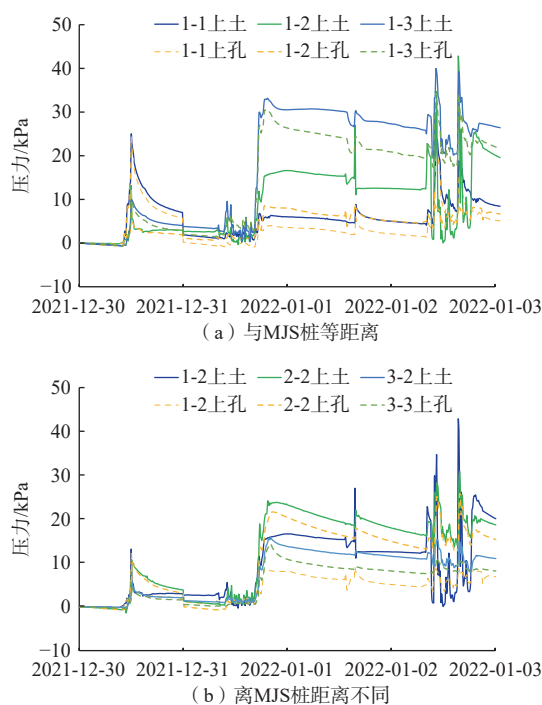


图 18 MJS 桩施工产生的超孔隙水压力和土压力

Fig. 18 Excess pore pressure and earth pressure caused by MJS construction

增加很快。在高压浆液摇摆喷射阶段, 超孔隙水压力随着喷射压力波动而波动。MJS 桩施工在不同测点产生超孔隙水压力和土压力对比见图 18。与土体的位移测试结果一致, 与 MJS 桩距离相等的测点, 因施工影响叠加导致测点 1-2 的超孔隙水压力和土压力最大; 离 MJS 桩距离不同的测点 1-2、2-2 和 3-2, 随着距离增加, 超孔隙水压力和土压力逐渐减小。另外, 从图 19 中还看出, MJS 桩施工产生的超孔隙水压力比土压力小, 这一点与水泥搅拌桩施工产生的超孔隙水压力和土压力不同, MJS 桩施工通过中间管将多余的泥浆抽出, 减小了施工影响, 提高了软土地基的加固效果。

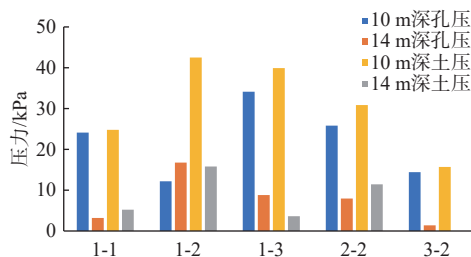


图 19 MJS 桩施工产生的压力比较

Fig. 19 Comparison of pressure caused by MJS

从图 20(a)中看出, MJS 桩与水泥搅拌桩施工产生的超孔隙水压力基本相同, MJS 桩施工产生的超孔

隙水压力比布袋桩大,但随着距离增加,MJS桩施工产生的超孔隙水压力消散很快。从图20(b)中看出,MJS桩与水泥搅拌桩施工产生的土压力基本相同。因此,从超孔隙水压力和土压力的测试结果看,MJS桩与搅拌桩的施工影响基本一样,相比较而言布袋桩的施工影响小。由于MJS桩在深层切削,导致土压力和超孔隙水压力随深度增加而增加。

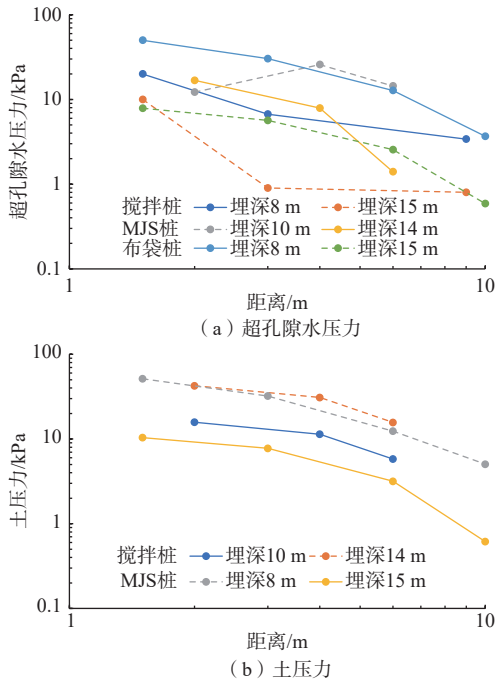


图 20 MJS 桩、搅拌桩和布袋桩施工产生的超孔隙水压力和土压力比较

Fig. 20 Comparison of earth pressure and excess pore water pressure caused by MJS, DCM and GRC constructions

## 4 结论

(1)水泥搅拌桩施工引起的土体位移具有累积效应,土体位移随距离增加而减小。超孔隙水压力与土压力同时增加,土体位移和超孔隙水压力与距离呈幂函数负相关关系。按照 10 mm 的变形控制标准,水泥搅拌桩施工的影响范围在 5 m 左右。

(2)高压旋喷桩的施工影响与桩径有关,桩径越大,旋喷桩施工引起的土体位移和产生的超孔隙水压力越大,施工影响范围在 10 m 左右。旋喷桩与管桩施工产生的超孔隙水压力基本相等,都比水泥搅拌桩施工产生的超孔隙水压力大。

(3)布袋桩施工引起的土体位移都不超过 10 mm,影响范围在 3 m 左右。

(4)MJS 桩的施工影响范围在 4 m 左右,与水泥搅

拌桩的施工影响范围接近。

(5)根据施工影响大小的排序,高压旋喷桩(管桩)>水泥搅拌桩(MJS 桩)>布袋桩,施工影响最大的是高压旋喷桩和管桩施工,施工影响最小的是布袋桩,水泥搅拌桩和 MJS 桩的施工影响介于两者之间。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 敖江忠,郑新江,李东,等.旋喷桩连续施工引起的地表变形现场试验研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(3):982-988. [AO Jiangzhong, ZHENG Xinjiang, LI Dong, et al. Field-test study on ground deformation in continuous construction of jet grouting[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(3): 982 - 988. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 武凤远,徐永福.地基处理施工扰动引起软土灾变的识别方法[J].地下空间与工程学报,2023,19(3):1001-1008. [WU Fengyuan, XU Yongfu. Identification method of soft soil disaster due to ground improvement construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(3): 1001 - 1008. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 何志超,徐永福.长江漫滩沉积软土地基处理施工灾变机制[J].工程地质学报,2023,31(6):2082-2092. [HE Zhichao, XU Yongfu. Disaster mechanism of soft soils in Yangtze River floodplain due to DCM construction[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 2082 - 2092. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 徐永福.粉体搅拌桩下沉原因分析及其对策[J].建筑技术,2000,31(3):171-172. [XU Yongfu. Settlement cause analysis of cement mixing pile and the solution thereof[J]. Architecture Technology, 2000, 31(3): 171 - 172. (in Chinese) ]
- [ 5 ] 潘涛.软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响[J].水文地质工程地质,2022,49(1):101-108. [PAN Tao. Influences of double-track shield tunnel construction on settlements of adjacent ground and buildings in a soft soil area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 101 - 108. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 邱明明,杨果林,张沛然,等.浅埋洞口段黄土公路隧道施工变形性状现场测试研究[J].水文地质工程地质,2021,48(3):135-143. [QIU Mingming, YANG Guolin, ZHANG Peiran, et al. Field test on the construction deformation characteristics for a loess highway tunnel at the shallow portal section[J].

- Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 135 - 143. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 徐永福, 王驰, 黄铭, 等. 湿喷桩施工中饱和粉土的触变性研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1784 - 1789. [ XU Yongfu, WANG Chi, HUANG Ming, et al. Thixotropy of saturated silty soils due to construction of DCM columns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1784 - 1789. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] XU Yongfu, SUN De'an, SUN Jun, et al. Soil disturbance of Shanghai silty clay during EPB tunneling[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2003, 18(5): 537 - 545.
- [ 9 ] 叶俊能, 周晔, 朱瑶宏, 等. 竹节桩复合地基沉桩施工超孔隙水压力研究 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 103 - 110. [ YE Junneng, ZHOU Ye, ZHU Yaohong, et al. A study of the excess pore water pressure during pile-sinking construction of nodular pile composite foundation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1): 103 - 110. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 孙钧. 城市环境土工学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005. [ SUN Jun. Urban Environmental Geotechnics [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2005. (in Chinese) ]
- [ 11 ] 蒋顺强, 陶涛, 秦长国, 等. 路基填筑和碾压对桥台土压力分布的影响研究 [J]. 中外公路, 2015, 35(2): 33 - 37. [ JIANG Shunqiang, TAO Tao, QIN Changguo, et al. Research on influence of subgrade filling and rolling on abutment earth pressure distribution[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2015, 35(2): 33 - 37. (in Chinese) ]
- [ 12 ] 张红, 秦文达, 张海凤, 等. 联络线施工对邻近线路基扰动影响 [J]. 高速铁路技术, 2021, 12(1): 35 - 40. [ ZHANG Hong, QIN Wenda, ZHANG Haifeng, et al. Disturbance of construction of connecting line to earthworks of adjacent lines[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1): 35 - 40. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 武孝天, 李洪涛, 徐永福. 双向搅拌桩施工对桩周土体扰动分析 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 127 - 132. [ WU Xiaotian, LI Hongtao, XU Yongfu. Soil disturbance around piles by bidirectional mixing columns construction[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(5): 127 - 132. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 邓永锋, 刘松玉, 洪振舜. 水泥土搅拌桩施工扰动评价的一种方法 [J]. 岩土力学, 2009, 3: 717 - 721. [ DENG Yongfeng, LIU Songyu, HONG Zhenshun. Disturbance degree of surrounding soil induced by deep mixing column installation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 3: 717 - 721. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 魏海涛, 蔡智. 施工顺序对软土地坪复合地基的影响探讨 [J]. 岩土工程技术, 2021, 35(1): 12 - 15. [ WEI Haitao, CAI Zhi. Discussion on influence of construction sequence on soft ground composite foundation[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2021, 35(1): 12 - 15. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 石舒. 隔离桩施工对邻近高铁高架桥桩基的变形影响分析 [J]. 世界桥梁, 2012, 40(5): 54 - 58. [ SHI Shu. A analysis of influence of isolation pile construction on deformation of pile foundation of adjacent high speed railway viaduct[J]. World Bridge, 2012, 40(5): 54 - 58. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 卞荣, 龙月, 贺雷, 等. 桩基施工对邻近顶管隧道的扰动影响 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7551 - 7557. [ BIAN Rong, LONG Yue, HE Lei, et al. The disturbance influence of pile foundation construction on adjacent pipe jacking tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18): 7551 - 7557. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 上海铁路局. 上海铁路局工务安全管理办法: SHG/GW 280—2017[R]. 上海: 上海铁路局, 2017. [ Shanghai Railway Bureau. Administrative Measures for public works safety of Shanghai Railway administration: SHG/GW 280—2017[R]. Shanghai: Shanghai Railway Bureau, 2017.(in Chinese) ]
- [ 19 ] 上海铁路局. 上海铁路局高速铁路运营期变形监测管理实施细则: SHG/GW277—2016[S]. 上海: 上海铁路局, 2016. [ Shanghai Railway Bureau. Detailed Rules for the management and implementation of deformation monitoring during the operation period of Shanghai Railway administration: SHG/GW277—2016[S]. Shanghai: Shanghai Railway Bureau, 2016. (in Chinese) ]
- [ 20 ] 徐永福, 傅德明. 结构性软土中打桩引起的超孔隙水压力 [J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 53 - 55. [ XU Yongfu, FU Deming. Excess pore pressure induced in piling in saturated structural soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 53 - 55. (in Chinese with English abstract) ]