

砂土层注浆引起地表隆起机制分析及试验研究*

张世杰^{1,2}, 刘人太¹, 李术才¹, 张连震¹, 姜鹏¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 中铁科学研究院有限公司, 成都 610032)

摘要: 隧道穿越砂土层易发生涌水涌沙、塌方等灾害, 注浆是软弱砂土地层常用的加固方式, 但浅埋隧道的预注浆极易引起地表隆起。笔者采用数值仿真、模拟实验与现场试验系统研究了注浆抬升效应的机制, 结果表明, 砂土层注浆引起地层抬升的体积由于地层压缩而逐步耗散, 地表显现部分按高斯函数的形状分布。依据砂土层抬升模拟试验与现场监测数据, 将抬升过程分为砂土体压缩、裂缝产生与发展、圆台抬升3个阶段, 通过试验研究砂土层抬升过程压力、位移变化规律, 得到地表隆起曲线与注浆量、加固宽度、地层埋深、地层力学参数之间的定量关系, 给出了估算公式, 并依托青岛地铁2号线开展现场试验进行验证, 希望能够对类似工程提供借鉴。

关键词: 砂土层注浆; 地表隆起规律; 定量关系; 现场试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-1097-08

Experimental Study on Ground Surface Heave Affected by Grouting in Sandy Soil Layer

Zhang Shijie^{1,2}, Liu Rentai¹, Li Shucui¹, Zhang Lianzhen¹, Jiang Peng¹

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Ji'nan 250061, P.R. China;
2. China Railway Academy Co., Ltd., Chengdu 610032, P.R. China)

Abstract: Tunnel through the sandy soil layer is apt to cause the disaster like gushing water, sand disasters and landslide, as grouting is the common reinforcing method in soft sandy soil layer. However, Pre-grouting in shallow tunnel easily causes ground surface heave. Adopting numerical simulation, analogue signal and field investigation, the mechanism of pre-grouting lifting effect is studied. The results show that pre-grouting in sandy soil layer can lead to ground surface heave, some of volume dissipate because of formation compression, the rest of the volume distributing on ground surface as shape of Gaussian function. Conduct uplifting in sandy soil layer simulation test, divide uplifting process to three phases: sandy soil layer compression, formation and expansion of cracks, uplifting as a circular truncated cone. Through the experimental study on the variation of pressure and displacement during uplift in sandy soil layer, obtain quantitative relation of surface uplift curve related to grouting amount, grouting range width, grouting formation depth, sandy soil mechanics parameters, and the quantitative relation is verified and apply to pre-grouting engineering in Qingdao metro line 2, with the hope to provide reference for similar projects.

Keywords: grouting in sandy soil layer; low of ground surface heave; quantitative relationship; field test

* 收稿日期: 2017-12-16(修改稿)

作者简介: 张世杰(1990-), 男, 山东济南人, 硕士, 主要从事地下工程灾害治理方面的科研与地铁结构设计工作。

E-mail: zhangsj1990@163.com

通讯作者: 刘人太(1984-), 男, 山东济南人, 副教授, 主要从事地下工程灾害防治方面的教学与研究工作。

E-mail: rentailiu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(41272385); 博导基金(20130131110032); 山东大学基本科研业务费资助项目(2015YQ002)

0 引言

地铁是解决城市交通拥堵的有效手段,国内外地铁建设正紧锣密鼓地进行。据统计,我国在建地铁城市有35个,在建里程2 525 km。城市地铁隧道埋深相对较浅,经常穿越第四系覆盖层,其中砂土层是常见的不良地质体,在地下水作用下往往发生涌水溃沙、塌方等灾害。超前预注浆是软弱砂土层常用的加固方式,然而浅埋隧道的预注浆常会引起地层抬升,进而带来地下管线脱节断裂、周边道路隆起开裂、地上建筑物倾斜等一系列问题,影响到城市正常秩序。目前关于注浆的研究^[1-8]集中在注浆材料研发、注浆理论创新、注浆技术革新等方面,注浆治理目标主要集中在加固与堵水方面,缺乏对注浆引起地层抬升问题的研究,工程实践中多是摸石头过河,缺乏定量估算方法,存在严重的盲目性和经验。国内外相关学者进行了探索^[9-14],Sagaseta^[15]采用镜像原理推导了弹性半无限空间有限深度地层损失或注浆引起的位移解;Gollegger^[16]在此基础上研究补偿注浆引起位移场的解;唐志伟等^[17-18]根据上述结论,通过FLAC3D数值模拟注浆隆起对地下管线的影响;李立新等^[19]研究注浆抬升位移的随机介质理论预测方法,分析表明,单孔注浆的随机介质理论预测模型可以有效地预测地表抬升位移,多孔注浆的预测结果与实际结果有一定的偏差;Zhang等^[20]根据随机介质理论及线性叠加原理,推导出了多浆泡在均匀及非均匀两种扩张模式下地表抬升变形的理论计算公式及其简化形式。目前,对注浆抬升效应的研究集中于理论与数值模拟方面。

本文在前人研究的基础上,在注浆诱发地表隆起的量化规律方面作进一步研究。通过数值仿真、模拟试验与现场试验等方法,分析了注浆抬升效应的机制,将地层抬升过程分为砂土体压缩、裂缝产生与发展、圆台抬升3个阶段,通过试验研究地层中压力、位移等的变化规律,建立地表隆起曲线与注浆量、注浆范围宽度、注浆地层深度、砂土层力学性质的定量关系,建立了采用注浆量估算地表隆起的计算式,并在青岛地铁区间隧道砂土层预注浆工程中进行现场应用与验证。结果证明,地表隆起曲线公式可适用于砂土地层注浆导致地表隆起的预测,希望为类似工程提供借鉴。

1 注浆抬升效应的机制

注浆对砂土地层的作用主要体现在2个方面:

(1)加固地层:注入地层的浆液形成浆泡或浆脉(压密注浆、劈裂注浆),压密砂土体并使土体固结,孔隙率变小,强度提高;少量浆液渗入孔隙率较大的砂土层中,将土颗粒粘固成大块固结体(渗透注浆),充满地层中可能存在的空洞裂隙(充填注浆),提高了土体的刚度。

(2)地层抬升:注入地层的浆液形成浆泡或浆脉,在砂土层中开辟出新的空间,相当于注浆引起被注砂土体体积膨胀,使地层抬升。

假设劈裂、压密注浆浆液体积与注入地层中的浆液总体积成正相关关系:

$$p = \frac{V_{sc}}{V_{inj}} \quad (1)$$

式中: p 为注浆抬升率; V_{sc} 为劈裂、压密注浆浆液体积; V_{inj} 为注入地层中的浆液总体积。

注浆抬升率 p 在注浆过程中不是常数,其值的大小受地层条件、应力大小、注浆材料等的影响,砂土层中以劈裂、压密注浆为主,浆液很少渗透,其取值一般为0.7~1.0。

应用Comsol Mutiphysics模拟一种砂土层注浆抬升情况,注浆区域深度为16 m,注浆范围宽度为10 m。此次模拟主要研究各地层隆起量变化情况,且注浆过程较为复杂,故将注浆过程及注浆量 V_{inj} 简化,用引起地层抬升的浆液体积表示,即劈裂、压密注浆浆液体积,取每延米3 m³,模型中通过施加固定位移来实现。建立平面应变问题弹塑性模型(模型尺寸为40 m×16 m),应用Mohr-Coulomb准则,地层参数如表1所示。数值模型如图1所示,CD为固定约束,AC、BD为辊支撑,AB为自由约束,首先对砂土体施加体积力使土体压缩固结(模拟重力作用),然后将固结后土体作为地层应力场及位移场的初始值,在EF段(EF=10 m)添加30 cm竖向位移,其他边界条件不变,进行土层抬升模拟计算。

表1 模拟地层基本力学参数

Table 1 Mechanical parameters of simulated formation

密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比 μ	弹性模量 E/MPa	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
1 700	0.3	2.0	1.0	18

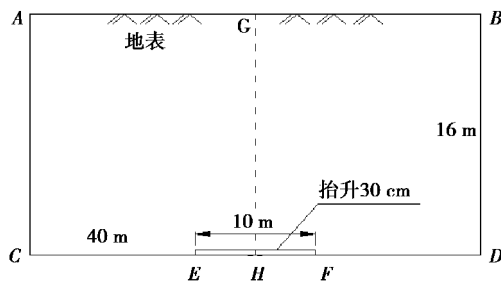


图1 模拟示意图

Fig. 1 Simulation schematic

图2为图1中沿GH各深度的竖向位移变化图。可以看到,竖向位移由初始的30 cm衰减为11 cm,且在距离初始抬升位置0~6 m段竖向位移衰减明显,约占总衰减量的80%。注浆引起的初始地层抬升会引起上覆地层的抬升,且距抬升位置的距离与竖向位移呈负相关,且距离越远,竖向位移变化率越小。地表竖向隆起位移变化曲线如图3所示,地表隆起在注浆区域正上方最大,随着距离中心越远而逐渐变小,同时,由于土体存在粘聚力,初始10 m的抬升宽度传至地表后抬升宽度大于40 m,地层抬升呈扩散趋势。初始抬升面积为3 m²,地表隆起面积约为2.52 m²,上覆地层在抬升过程中,同样会伴随着砂土体的压缩固结,部分抬升体积随上覆地层传递耗散在地层中。

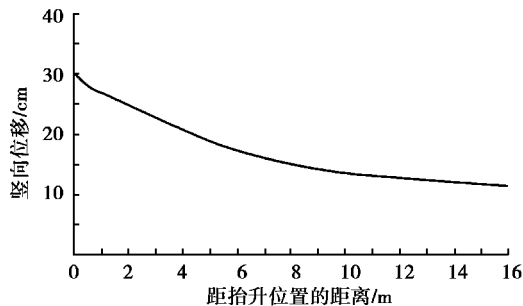


图2 抬升位移随深度变化图

Fig. 2 Uplift displacement with the changes of depth

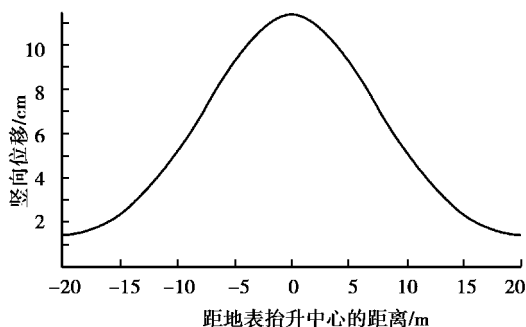


图3 地表隆起位移图

Fig. 3 Ground surface uplift displacement

地层初始抬升体积为 V_{sc} , 地表隆起的体积记为 V_s , 地层初始抬升体积在向上传递的过程是逐渐减少的, 减少的部分即为上覆土层压缩的体积, 记为 V_{Com} , 那么

$$V_{sc} = V_s + V_{Com} \quad (2)$$

定义 η 为地层耗散率, 则

$$\eta = \frac{V_{Com}}{V_{sc}} \quad (3)$$

η 的大小与土层深度、注浆压力、地层条件等密切相关。

地表隆起位移随距抬升中心的距离变化规律为一条倒V字形的曲线, 记为 S , 对抬升位移的积分为抬升地表隆起体积, 即

$$V_s = \int S dx \quad (4)$$

那么

$$p \cdot (1 - \eta) \cdot V_{inj} = \int S dx \quad (5)$$

地层抬升的体积等于地表隆起曲线 S 在 X 轴上的积分。若确定 η 的值及地表隆起曲线 S 的形状函数, 进而确定地表隆起曲线 S 的函数参数与地层的力学参数、注浆范围宽度、地层深度等因素的量化关系, 即可得到地表隆起曲线 S 关于注浆量、注浆范围宽度、地层深度、地层力学参数的函数表达式。

2 试验设计

2.1 试验系统设计

注浆抬升效应试验系统如图4所示, 主要包括试验架、抬升模块及数据采集模块。试验架为2 m×0.3 m×1.2 m 准三维可视化钢制试验装置, 通过前后面安装钢化玻璃实现抬升效果的可视化。抬升模块主要为两个最大载重2 t的千斤顶, 数据采集模块分别通过预埋设的棉签与土压力传感器来采集地层各深度处的隆起量与土压力。



图4 地层抬升试验系统

Fig. 4 Stratigraphic uplift test system

模拟地层宽度试验几何相似比尺为 20:1,模拟地层尺寸为 40 m×16 m,模拟试验简化的注浆过程,底部用于抬升的钢板宽 50 cm,通过钢板抬升的体积模拟浆液有效抬升体积(即劈裂、压密注浆体积)。

2.2 试验系统设计

试验原料与填料方式试验选用青岛地铁啤苗区间第四系砂土层,采集深度 1~2 m,其基本力学参数如表 2 所示。如图 5 所示,钢板上土层深度为 80 cm,分 8 层填料,每一层中间设置 3 个土压传感器,填料过程中连接土压传感器,用木板轻轻压实,控制每层砂土体内土压力,由上至下依次为 19.6 kPa、58.8 kPa、98.0 kPa、137.2 kPa、176.4 kPa、215.6 kPa、254.8 kPa、29 4kPa,模拟砂土体自重作用下固结过程。从下往上每隔 10 cm 埋设一排棉签,棉签位于图 5 中横线处,棉签横向间距为 10 cm。

表 2 试验用土基本力学参数
Table 2 Mechanical parameters of soil

压缩模量 E_s/MPa	孔隙比 e	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	容重 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	含水率 $w/\%$
5.1	0.74	4.2	18	19.6	18.6

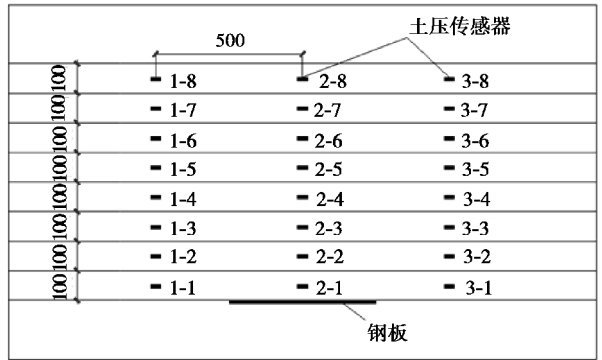


图 5 土压传感器布置图(单位:mm)

Fig. 5 Soil pressure sensor layout (unit: mm)

2.3 试验过程控制

填料完成后,连接好试验架及数据采集模块,将土压传感器压力值清零,测量抬升过程中砂土层的附加应力。开始试验,通过两侧千斤顶控制钢板缓慢抬升,控制钢板抬升位移为 1 cm、1.5 cm、2 cm、3 cm、4 cm、5 cm,分别代表实际注浆工程中用于劈裂、压密注浆浆液体积为 2 m²、3 m²、4 m²、6 m²、8 m²、10 m²。试验过程中,测量每一次棉签的位移来记录地表及各地层的位移,并实时观察地层抬升及裂缝产生情况。

3 试验结果及分析

3.1 土层抬升阶段划分

随着底部施加位移逐渐增大,上覆土体抬升大致经历 3 个阶段:

3.1.1 土体压缩阶段

如图 6 所示,此阶段初始抬升位移较小,上覆砂土层发生压缩变形,抵消大部分抬升位移;随着初始抬升量的增大,砂土体的压缩量随之增大,砂土层对抬升位移的吸收能力也逐渐降低。此阶段内砂土层对抬升位移耗散的效果最大。

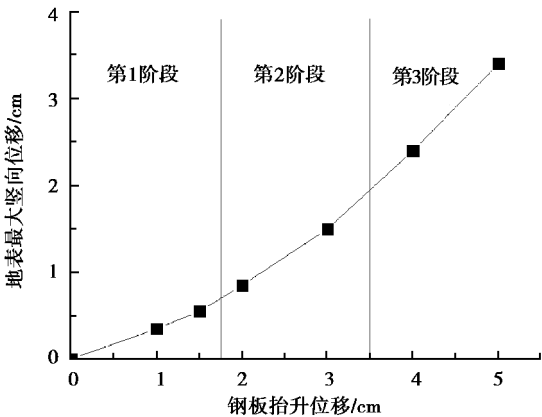


图 6 地表最大竖向位移变化

Fig. 6 The maxium vertical displacement of ground surface

3.1.2 裂缝产生发展阶段

如图 7(a) 所示,抬升处正上方地表首先产生竖向裂缝,并由上至下扩展,裂缝的产生使得裂缝扩展区域弹性势能释放,土体回弹,地表隆起有小幅瞬时增长;裂缝扩展区域(h 段)土体不再压缩,地表直接反映 h 深度处抬升量,裂缝未扩展区域仍被压缩,但压缩量相对第一阶段较小。

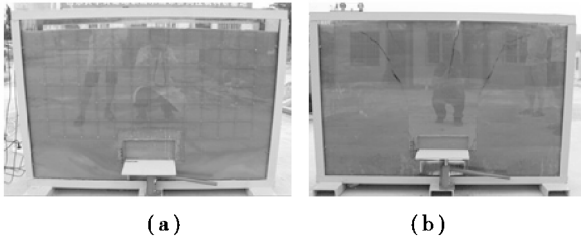


图 7 各阶段抬升图

Fig. 7 Ground uplifting of each stage

3.1.3 圆台抬升阶段

如图 7(b) 所示,当裂缝发展至一定深度时,停止扩展,基本不再变化。由抬升处由下至上呈倒梯形形状产生裂缝,直至贯通至地表,与原有土体分离,

形成单独的抬升圆台,土层基本不再压缩,地表隆起将完全反映地下抬升量。但在实际工程现场中,往往由于注浆量小、浆液窜至地表等原因,地层抬升不会发展至此阶段。

3.2 抬升压力变化规律

试验过程中,对各深度处地层压力全程监测得到各深度地层压力变化情况,抬升钢板正上方不同深度压力值如图8所示。压力值在近地表处很小,随深度的增大而逐渐变大,土层的压缩主要发生在距抬升位移近的砂土层,随着第2阶段裂缝的产生,近地表处附加应力会逐渐减少,近地表土压力达到最大是第1、2阶段的临界条件。随着抬升位移的增大,压力值到达峰值后有下降趋势。这是因为随着斜向裂缝的贯通,抬升圆台与原土体分离,不再受土层粘聚力的作用,底部土压力达到最大是第2、3阶段的临界条件。土体之间咬合力的存在,使第3阶段压力值随抬升位移增大出现波动。

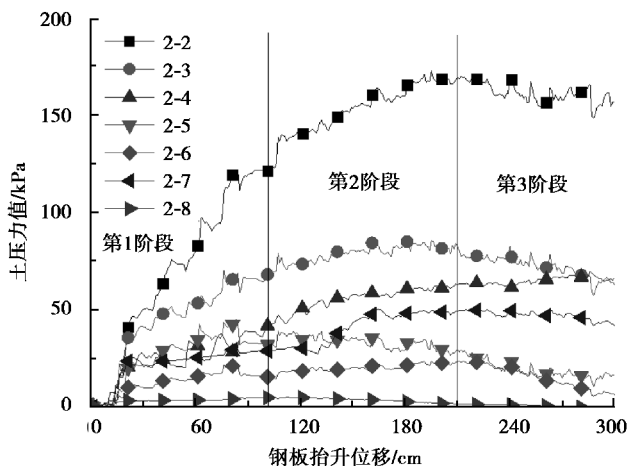


图8 不同深度地层压力图

Fig. 8 Strata pressure in different depth

3.3 抬升位移变化

3.3.1 θ 值

当初始抬升位移达到4 cm时,土体抬升处于圆台抬升阶段,经测量,抬升角 θ 为 62° ,该砂土层的内摩擦角为 18° ,抬升角的大小约等于该砂土层被动土压力角,即 $\theta \approx 45^\circ + \varphi$,如图9所示。

抬升过程中,抬升钢板正上方区域地表竖向位移明显大于其他区域,是注浆对地表隆起主要影响区域,该区域范围为到达圆台抬升阶段时两斜向裂缝所夹区域。

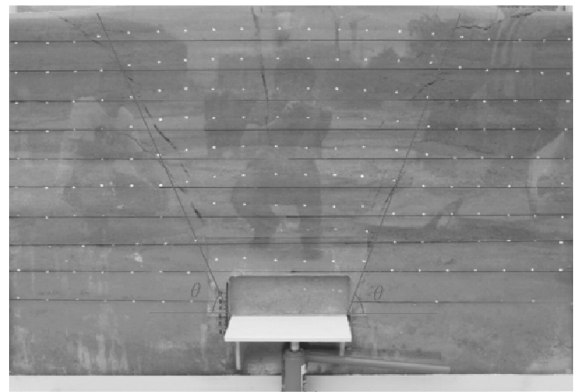


图9 土体抬升 θ 角

Fig. 9 Angle θ during soil uplifting

3.3.2 地表隆起位移

随着钢板抬升位移的,地表隆起竖向位移亦逐渐增大。如图10所示,地表隆起位移曲线近似高斯函数,在钢板抬升位移较小时,抬升曲线比较扁平,钢板抬升位移较大时,抬升曲线较为高陡,随着钢板抬升位移的增大,位移增量越来越大。

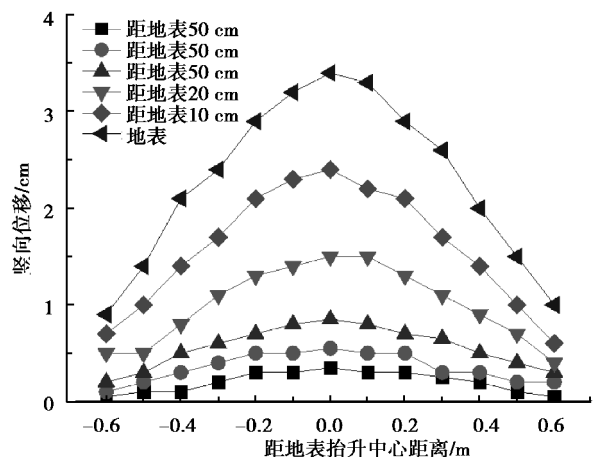


图10 地表隆起位移图

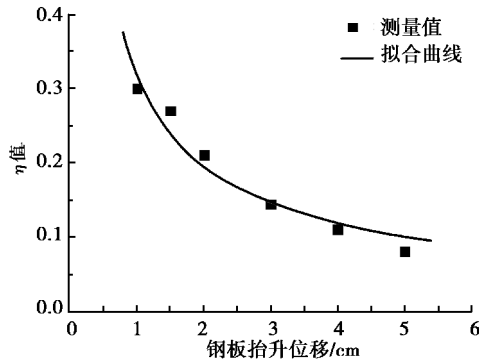
Fig. 10 Ground surface rising displacement

3.3.3 η 值变化规律

抬升过程中,测量地表各处的位移得到地表隆起竖向位移曲线,并据此估算出地表隆起面积,根据式(2)、式(3)计算钢板不同抬升位移时的 η 值,对所得数据进行拟合,如图11所示。拟合方程为:

$$\eta = 0.32136x^{-0.72099} \quad (6)$$

在第1抬升阶段, η 值在0.3左右,且随钢板抬升位移的增大而逐渐减小,其减小速率逐渐降低,到第3阶段, η 值在0.1左右。

图 11 η 值与其拟合曲线Fig. 11 η and its fitting curve

3.4 抬升方程的建立

根据数值仿真及模拟试验所得地表隆起形状,近似为开口向下的抛物线,但与抛物线不同的是,地表隆起曲线存在明显的拐点。采用高斯函数来模拟地层隆起曲线,即

$$S = ae^{-\frac{(x-b)^2}{c^2}} \quad (7)$$

式中 a 、 b 、 c 为实数常数, $a > 0$, 将函数对称轴置于 x 轴上, 即 $b = 0$ 。

注浆范围宽度为 d , 注浆区域深度为 h , S 的积分为 $ac\sqrt{\pi}$, 最大值为 a , 拐点处 x 值为 $c/\sqrt{2}$, 高斯函数在拐点处的 x 值对应于圆台抬升阶段地表裂缝位置, 通过图 12 可计算得到

$$c = \frac{\sqrt{2}d}{2} + \frac{\sqrt{2}h}{\tan \theta} \quad (8)$$

通过代入式(5)可得到

$$a = \frac{p(1-\eta)V_{inj}}{\frac{\sqrt{2\pi}d}{2} + \frac{\sqrt{2\pi}h}{\tan \theta}} \quad (9)$$

那么地表隆起曲线为

$$S = \frac{p(1-\eta)V_{inj}}{\frac{\sqrt{2\pi}d}{2} + \frac{\sqrt{2\pi}h}{\tan \theta}} e^{-\frac{x^2}{\frac{\sqrt{2}d}{2} + \frac{\sqrt{2}h}{\tan \theta}}} \quad (10)$$

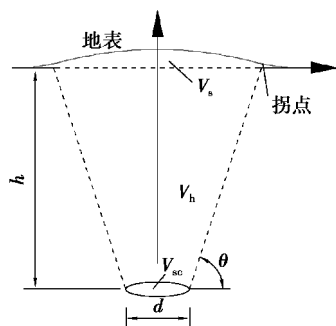


图 12 地表隆起曲线模拟示意图

Fig. 12 Schematic of simulation curve of surface uplift

4 现场试验

青岛地铁 2 号线啤-苗区间隧道拱顶为砂土层, 下方为风化花岗岩, 拱顶易产生涌水溃沙、塌方等工程事故, 且周边环境条件复杂, 管线密布, 易产生次生灾害。为确保地铁隧道安全通过, 采用超前周边帷幕注浆对上覆砂土层进行加固堵水, 注浆工艺采用前进式分段注浆, 加固圈宽度为 10 m, 注浆材料采用水泥-水玻璃双液。注浆次序分为三环。终孔位置分别位于掌子面前方 5 m、8.5 m、12 m 处, 注浆过程中对地表隆起进行实时监测。如图 13 所示为掌子面前方 8.5 m 处隧道及监测点位置图。

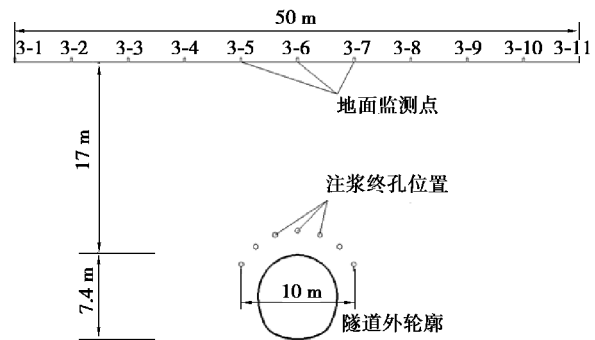


图 13 监测位移随注浆量变化图

Fig. 13 Monitor displacement changes with grouting

第Ⅱ序孔注浆过程中, 单孔注浆量均为 2.5 m^3 , 注浆孔出浆段纵向长度为 3.5 m, 浆液扩散半径为 2 m, 注浆量约为每延米 2.33 m^3 。距掌子面 8.5 m 处的一排监测点监测结果如图 14 所示, 注浆初始阶段地表竖向位移很小, 随注浆量缓慢增长, 且未出现抬升位移随注浆量增长而显著增大趋势, 属于第一抬升阶段, 上覆砂土层发生压缩变形, 抵消大部分抬升位移。

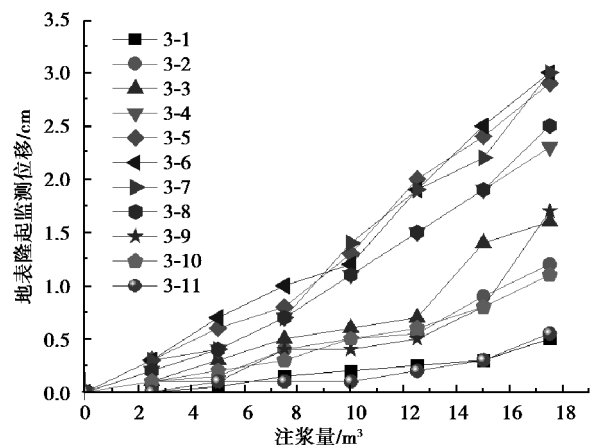


图 14 监测位移随注浆量变化图

Fig. 14 Monitor displacement changes with grouting

根据注浆后开挖情况发现,由于砂土层存在部分粗沙聚集区域,少量浆液可以渗透,如图 15 所示,对注浆后注浆区域各处取多组岩样,对岩样中劈裂、压密浆液体积占总体积的百分比进行统计分析发现,约有 80% 的浆液用于劈裂、压密注浆,且开挖时发现下部风化花岗岩微裂隙中存在少量浆脉,综合浆液扩散方式及扩散范围考虑,取 $p=0.75$;劈裂、压密注浆浆液体积为每延米 1.7475 m^3 ,浆液扩散范围宽度 d 为 14 m ,得到抬升高度为 12.5 cm ,对应模拟试验中钢板抬升 0.625 cm ,根据图 11 中 η 值拟合曲线,取 $\eta=0.36$;深度 h 为 16 m ,砂土层内摩擦角为 62° ,代入式(8)、式(9)计算得 $a=0.0288$, $c=21.9307$ 。通过计算所得的地表曲线与实际隆起位移监测如图 16 所示,可以看到,实际隆起位移与计算所得地表曲线趋势基本吻合。

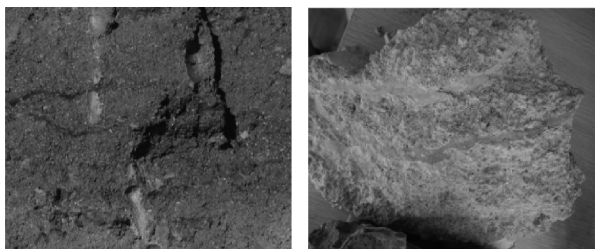


图 15 开挖揭露与岩样照片

Fig. 15 Excavation and the rock specimen photograph

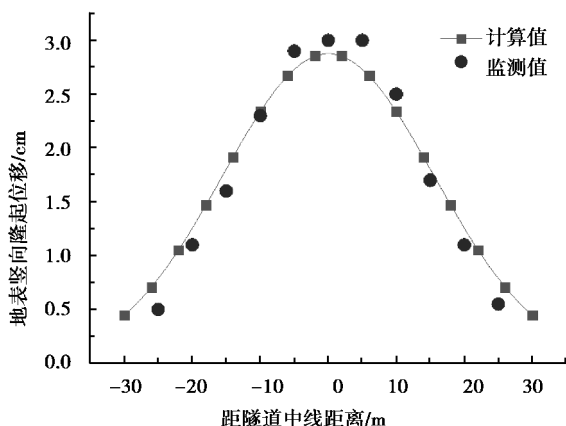


图 16 监测曲线与计算曲线

Fig. 16 Monitoring curve and the calculated curve

5 结论

(1) 砂土层注浆浆液扩散形式主要为劈裂、渗透注浆,隧道埋深较浅时往往引起地层抬升,地层

抬升体积传至地表过程中,一部分由于地层被压缩而耗散于地层中,地表显现的部分按高斯函数的形状分布。

(2) 注浆引起上覆砂土层抬升,大致分为 3 个阶段:砂土体压缩阶段、裂缝产生与发展阶段、圆台抬升阶段。当裂缝产生后,随注浆量增大,土层隆起处于迅速上升阶段。现场注浆工程中,应将土层抬升控制在土体压缩阶段,当裂缝产生时应停止注浆。

(3) 通过理论分析、数值仿真与现场试验系统,研究砂土层抬升中压力、位移变化规律,得到地表隆起曲线与注浆量、注浆范围宽度、注浆地层埋深、砂土层力学参数之间的定量关系,并于青岛地铁 2 号线注浆工程中进行验证与应用,理论与实际结果吻合较好,能够为类似工程提供借鉴。

参考文献 (References)

- [1] 李术才,刘人太,张庆松,等. 基于黏度时变性的水泥-玻璃浆液扩散机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2415-2421. (Li Shucai, Liu Rentai, Zhang Qingsong, et al. Research on C-S slurry diffusion mechanism with time-dependent behavior of viscosity[J] Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2415-2421. (in Chinese))
- [2] 张庆松,韩伟伟,李术才,等. 灰岩角砾岩破碎带涌水综合注浆治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2412-2419. (Zhang Qingsong, Han Weiwei, Li Shucai, et al. Comprehensive grouting treatment for water gushing analysis in limestone breccias fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2412-2419 (in Chinese)).
- [3] 刘人太. 水泥基速凝浆液地下工程动水注浆扩散封堵机理及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2012. (Liu Rentai. Study on diffusion and plugging mechanism of quick setting cement based slurry in underground dynamic water grouting and its application [D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese))
- [4] 吴祖松,梁波,王元清,等. 水下圆形隧道注浆加固区渗流特征理论研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 89-94. (Wu Zusong, Liang Bo, Wang Yuanqing, et al. Research on seepage characteristics theory of grouted

- reinforced area of underwater round tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36 (S2): 89-94. (in Chinese)
- [5] 雷华阳,仇王维,吕乾乾,等.盾构施工中注浆因素对地表沉降的影响研究[J].*地下空间与工程学报*, 2015, 11 (5): 1303-1309. (Lei Huangyang, Qiu Wangwei, Lv Qianqian, et al. Study on the Impact of the Grouting Factors on Surface Subsidence in the Process of Shield Construction [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11 (5): 1303-1309. (in Chinese))
- [6] 赵立财.注浆管棚在隧道穿越富水软弱带开挖效应研究[J].*地下空间与工程学报*, 2014, 10 (S2): 1853-1859. (Zhao Licai. Research on Excavation Effect of Grouting Pipe-roof in Tunnel Passing through Water-rich Weak Zone [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10 (S2): 1853-1859. (in Chinese))
- [7] 张霄.地下工程动水注浆过程中浆液扩散与封堵机理研究及应用[D].济南:山东大学,2011. (Zhang Xiao. Study on mechanism of slurry diffusion and sealing at the process of underground engineering moving water grouting and its application [D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese))
- [8] 张霄,李术才,张庆松,等.矿井高压裂隙涌水综合治理方法的现场试验[J].*煤炭学报*, 2010, 35 (8): 1314-1318. (Zhang Xiao, Li Shucan, Zhang Qingsong, et al. Field test of comprehensive treatment method for high pressure dynamic grouting [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35 (8): 1314-1318. (in Chinese))
- [9] Yang X L, Wang J M. Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26 (3): 462-471.
- [10] Kasper T, Meschke G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21 (2): 160-171.
- [11] Liu H P, Liu L J. Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26 (2): 276-283.
- [12] Coulter S, Martin C D. Effect of jet-grouting on surface settlements above the Aeschertunnel, Switzerland [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21 (5): 542-553.
- [13] Kasper T, Meschke G. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling [J]. *Computers and Geotechnics*, 2006, 33 (4): 234-247.
- [14] 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 Xiaoli, Zhang Dingli, Wang Mengshu, et al. Existing subway grouting uplift reasonable position to determine [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30 (5): 712-717. (in Chinese))
- [15] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss [J]. *Geotechnique*, 1987, 37 (3): 301-320.
- [16] Gollegger J. Numerical and analytical studies of the compensation grouting [D]. Austria: Graz University of Technology, 2001.
- [17] 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 Zhiwei, Zhao Chenggang, Zhang Dingli. 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))
- [18] 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, 29 (6): 1512-1516. (Tang Zhiwei, Zhao Chenggang. Mechanisms of ground heave by grouting and analytical solutions & numerical modeling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29 (6): 1512-1516. (in Chinese))
- [19] 李立新,童无欺,邹金锋.注浆抬升位移的随机介质理论预测方法[J].*铁道科学与工程学报*, 2013, 10 (5): 47-51. (Li Lixin, Tong Wuqi, Zou Jinfeng. Study on grouting uplift displacement prediction using stochastic medium theory [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2013, 10 (5): 47-51. (in Chinese))
- [20] Zhang M, Wang X H, Wang Y. Mechanism of grout bulb expansion and its effect on ground uplifting [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2011, 18 (6): 874-880.