

引用本文:李 博,王贵和,吕高峰,等. 导管法水下混凝土灌注厚度的颗粒流模拟[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(2):118-126.

LI Bo, WANG Gui-he, LYU Gao-feng, et al. Particle Flow Simulation of Underwater Concrete Filling Thickness by Tremie Method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 118-126.

DOI:10.19815/j.jace.2019.03047

导管法水下混凝土灌注厚度的颗粒流模拟

李 博¹, 王贵和¹, 吕高峰², 任 军³, 于 博¹

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100068;
3. 中交隧道工程局有限公司, 北京 100102)

摘要:依托北京地铁 8 号线永定门外站深基坑工程,介绍了导管法水下混凝土灌注工艺在深基坑封底工程中的应用。基于颗粒流理论和细观力学理论,将土体微细观结构与宏观行为联系起来,采用 PFC 数值软件建立了水下混凝土灌注模型,实现了砂卵石地层单导管、多导管水下混凝土灌注过程的可视化,得到各时段的灌注情况及最终封底结果。对比同位置实测厚度曲线,得到最大误差 0.3 m,验证了模型的合理性。分析了影响深基坑水下混凝土灌注厚度的敏感性因素(导管布置形式、地下水位高度)。结果表明:基于颗粒流理论的 PFC 数值仿真技术适用于模拟导管法水下混凝土灌注过程;导管布置稀疏,颗粒无法相互作用,容易出现“堆积”和“凹陷”现象,平均灌注厚度不足 3 m;参考单导管水下混凝土 3 m 的扩散半径,适当加密导管,可保证封底厚度;地下水位越高,厚度起伏越大,水位越低,灌注厚度越均匀;工程允许范围内,适当加密导管可保证混凝土封底厚度;采取降水措施降低地下水位,可保证封底平整度。

关键词:导管法;水下混凝土灌注;灌注厚度;PFC 数值模拟;导管布置;地下水位

中图分类号:TU470

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)02-0118-09

Particle Flow Simulation of Underwater Concrete Filling Thickness by Tremie Method

LI Bo¹, WANG Gui-he¹, LYU Gao-feng², REN Jun³, YU Bo¹

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Beijing Metro Construction Administration Corporation Ltd., Beijing 100068, China;
3. CCCC Tunnel Engineering Company Limited, Beijing 100102, China)

Abstract: Based on the deep foundation pit project of Yongdingmenwai Station of Beijing Metro Line 8, the application of the underwater concrete filling process of the tremie method in the deep foundation pit sealing project was introduced. On the basis of particle flow theory and micromechanics, the micro-structure and macro-behavior of soil were connected. The underwater concrete filling model was established by PFC numerical software. The visualization of underwater concrete pouring process of single-tremie and multi-tremie in sandy pebble stratum was realized, and the pouring situation and final sealing results in each period were obtained. Comparing the measured thickness curves of the same position, the maximum error was 0.3 m,

收稿日期:2019-05-21

基金项目:住房和城乡建设部科技计划项目(2016-K4-056)

作者简介:李 博(1990-),男,河北张家口人,工学博士研究生,E-mail:357428609@qq.com。

which verified the rationality of the model. The sensitivity factors affecting the thickness of underwater concrete in deep foundation pits (the form of tremie arrangement and the height of groundwater level) were proposed. The results show that the PFC numerical simulation technology based on particle flow theory is suitable for the underwater concrete filling process of simulated tremie method. When the tremie layout is sparse, the particles can not interact, the more likely to appear “stacking” and “sinking”, the average filling thickness is less than 3 m. Refer to the diffusion radius of 3 m of single-tremie underwater concrete, the tremie should be properly encrypted to ensure the thickness of the back cover. The higher the groundwater lever is, the greater the thickness fluctuation is. The lower the water level is, the more uniform the filling thickness is. Within the scope of the project, the appropriate encryption of the tremie can ensure the thickness of the concrete back cover. The use of precipitation measures to reduce the groundwater level can ensure the flatness of the back cover.

Key words: tremie method; underwater concrete filling; filling thickness; PFC numerical simulation; tremie arrangement; groundwater level

0 引言

近年来在钻孔灌注桩基础上发展起来的水下混凝土灌注技术较好地避免了传统工艺的弊端,被用于特大型工程桥梁、港口及深基坑封底等工程^[1-2]。由于水下灌注混凝土不同于地上浇注,在控制灌注进度和提高灌注质量等方面会出现诸多困难^[3-4]。

目前,水下混凝土的施工方法一般是在水上拌制混凝土拌合物,水下进行灌注,如导管法、泵压法、柔性管法等^[5-8],其中导管法是将密封连接的钢管作为水下混凝土的灌注通道,其底部埋在混凝土拌合物内,在落差压力作用下,形成连续密实的混凝土桩身。导管法施工具有整体性好、浇注速度快、不受仓面大小限制等优点,在工程中应用最为广泛^[9]。20世纪初,美国成功应用导管法进行了水下混凝土浇注,在修建底特律河隧洞和珍珠港干船坞时收到良好效果。1968年荷兰人首次使用柔性软管和刚性出料口的液阀法成功浇注了水下底板和护坡等水下混凝土结构物。中国于20世纪80年代末期开始研究和应用水下混凝土灌注,包括沉井封底、水中浇注、海工结构等一系列工程^[10-12]。

现有文献大多只是对灌注工艺的展示,缺乏对水下混凝土封底的理论研究。国外资料只有杨文渊等^[13]于解放初期引进的苏联经验模型。1987年铁道部基建总局编写的《铁路工程技术手册桥涵》指出了混凝土封底质量的几个关键性指标,如扩散半径,水位高度等,但仅提出有效浇注半径一般为3~5 m,流动坡度不宜低于1:5等部分内容。本文基于北京地铁8号线永定门外站基坑工程水下混凝土封

底施工方案,采用PFC软件模拟该工程水下混凝土灌注封底效果,可视化砂卵石地层中的导管法水下混凝土灌注全过程,对比实际工程,分析了影响混凝土封底厚度的敏感性因素,为今后类似工程的方案优化设计提供工程参考,为水下混凝土颗粒流理论研究提供借鉴。

1 工程概况

1.1 车站概况

永定门外站采用明挖法施工,基坑施工深度大,地层复杂,地下水含量丰富且存在承压水,难以直接抽排降水,故采用“连续墙帷幕+水下混凝土封底”的组合止水方案。水位线以上采用常规开挖方式,水位线以下厚度较大的卵石层采用水下开挖施工。支护结构剖面、地层剖面及主要参数如图1所示。基坑标准段封底混凝土厚度为4 m,端头井封底混凝土厚度为5 m;设置1 m厚分仓墙将坑底分为16仓;采用1.2 m厚的地连墙作为止水帷幕。地下水位为19.00 m(地面以下20.42 m),封底所在地层主要位于卵石层(杂色,密实,亚圆形,一般粒径为4~8 cm,最大粒径约为15 cm,重型动力触探数平均值为115,中粗砂充填30%~35%)。

1.2 水下混凝土封底方案

混凝土浇注分16仓进行施工(图2),混凝土灌注导管直径为300 mm,长度为40.5 m。采用C35混凝土,进行首灌施工时,首灌半径为5 m,导管离底面0.3 m,导管埋深为1 m。根据标准单导管扩散半径为3.9 m,计算得到单导管扩散面积为47.76 m²。单仓面积为203.15 m²,计算需要导管根数为

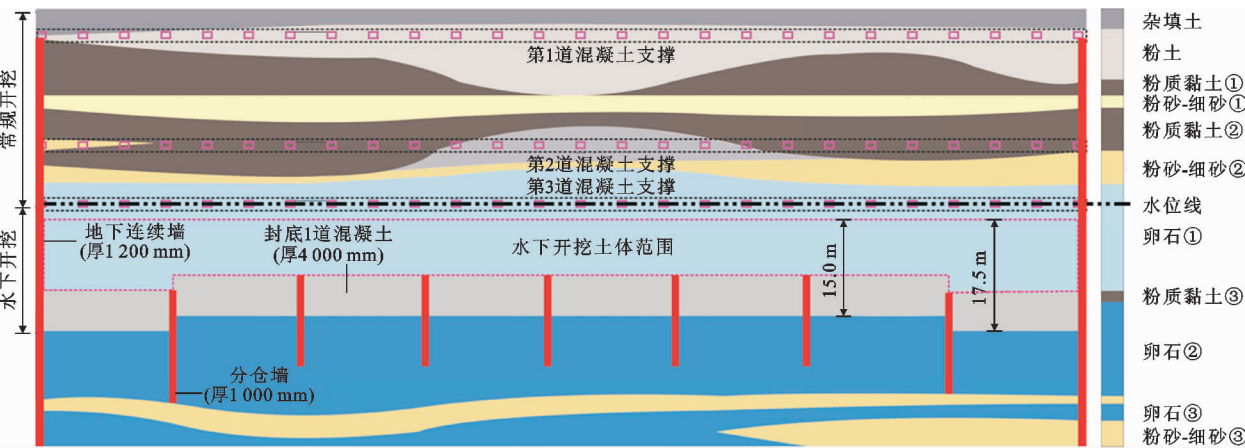


图 1 基坑支护、地层、开挖示意

Fig. 1 Schematic of Foundation Pit Support,Stratum and Excavation

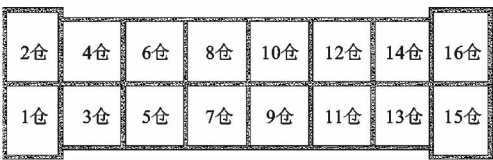


图 2 坑底分仓平面

Fig. 2 Partition Plane of Pit Bottom

4.25 根。为了保证后期的浇注质量和浇注平整度，现场采用 7 套导管进行施工，具体尺寸如图 3 所示。首灌注完成后，进行分区域找平浇注，直至浇注完成。

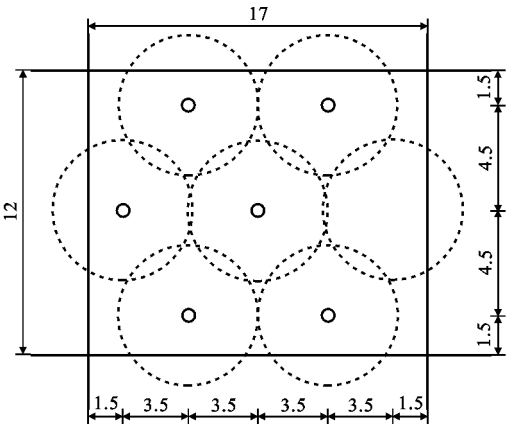


图 3 导管灌注平面尺寸(单位:m)

Fig. 3 Tremie Pouring Plane Size (Unit:m)

采用海上测量常用的回声探测仪测量封底厚度。浇注过程中每 0.5 h 进行 1 次标高测量。测量完成后及时绘制混凝土标高曲线图，实时控制混凝土表面平整度，导管及测点布置如图 4 所示。

2 水下混凝土封底数值实现

土体可视为一个由单粒、集粒或凝块等骨架单元共同形成的空间结构体系，对于土体这种复杂材

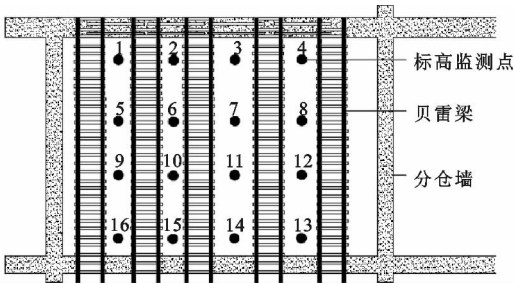


图 4 测点布置

Fig. 4 Layout of Survey Points

料很难建立宏观与微观的定量关系。颗粒流方法克服了传统连续介质力学模型的宏观连续性假设，计算时只需定义颗粒和黏结的几何和力学参数，并认为给定介质在不同应力条件下的基本特性主要取决于粒子之间接触状态的变化^[14-16]。颗粒可以代表材料中的砂粒，也可以代表黏结在一起的固体材料，例如混凝土或岩石。本文通过引入颗粒流理论，将土体微观结构与宏观行为联系起来，完成工程的数值实现。

2.1 颗粒流理论基本方程及物理模型

颗粒流理论以力-位移定律和牛顿第二定律为基础，首先通过力-位移定律的计算，更新颗粒接触部分的接触力；然后通过牛顿第二定律，更新颗粒与墙体的位置，重新调整颗粒间的接触。二者交替作用，以时步迭代计算整个颗粒结合，直至达到平衡状态或发生破坏无法保持稳定状态结束计算运行。

2.1.1 物理方程

颗粒流模型中仅存在“颗粒-颗粒”接触与“颗粒-墙体”接触 2 种接触类型关系^[17]，见图 5，其中 A,B 表示颗粒单元,W 表示边界墙,R 为颗粒单元半径,U 为重叠量,X 为颗粒单元圆心。

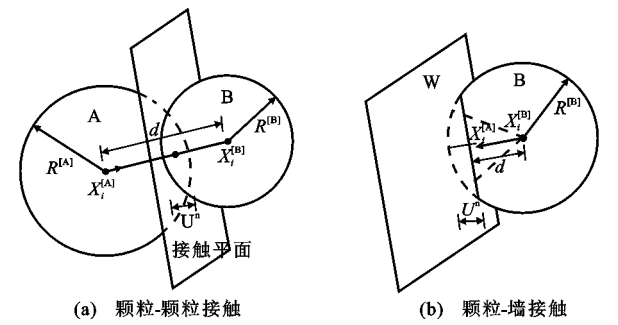


图 5 颗粒流接触模型

Fig. 5 Particle Flow Contact Model

假定两接触颗粒之间产生的法向接触力 F^n 与它们之间法向位移量 U^n (颗粒-颗粒或颗粒-墙体的变形重叠量)成正比,即

$$F_i^n = K^n U^n n_i$$
$$n_i = (X_i^{[B]} - X_i^{[A]})/d, d = |X_i^{[B]} - X_i^{[A]}|$$

式中: K^n 为法向接触刚度系数; n_i 为接触法向; $X_i^{[A]}$, $X_i^{[B]}$ 分别为颗粒单元 A 和 B 中心坐标矢量; d 为 2 个颗粒单元中心间的距离。

在确定了接触法向之后,法向接触位移量 U^n 可通过下式计算。

$$U^n = \begin{cases} R^{[A]} + R^{[B]} - d & \text{颗粒-颗粒接触} \\ R^{[B]} - d & \text{颗粒-边界墙接触} \end{cases}$$

切向接触力采用增量的形式计算,这里不再赘述,具体参见文献[17]。

2.1.2 运动方程

计算作用于每个颗粒上的合力及合力矩,由牛顿第二定律,根据颗粒受力情况确定颗粒的加速度与角加速度,进而得到单位时间步长内颗粒的速度和角速度以及位移和转动量。假定在 t_0 时刻颗粒在 X 方向合力为 F_X ,弯矩为 M_X ,转动惯量为 I_X ,则得到颗粒在 X 方向平均加速度 \ddot{u}_X 和转动加速度 $\ddot{\omega}$ 分别为[18]

$$\ddot{u}_X(t_0) = \frac{F_X}{m}, \ddot{\omega}(t_0) = \frac{M_X}{I_X}$$

式中: m 为颗粒质量; I_X 为角动量。

2.2 颗粒参数设置

混凝土是由粗骨料、砂浆、水泥、水以及其他外加剂构成的组合体。为简化模型,将混凝土视为粗骨料和水泥砂浆两相组成,采用不同材料属性的 2 类颗粒来表征(图 6)。建模过程中,做出如下假设:①混凝土各细观组成相材料都是理想均匀、各向同性的弹性材料,颗粒单元都被视为刚体;②混凝土各细观相介质之间粘结完好,接触行为允许重叠,但重叠量要远远小于颗粒半径;③由于只是为了找到颗

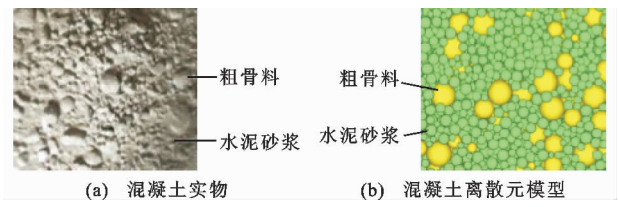


图 6 混凝土两相颗粒模拟

Fig. 6 Simulation of Concrete Two Phase Particles

粒的宏观厚度,忽略骨料形状、级配的影响,采用同一粒径的球形颗粒模拟骨料。颗粒参数主要包括颗粒本身、刚度、粒径、摩擦因数,具体见表 1。

表 1 颗粒微观参数

Tab. 1 Particle Microparameters

| 参数 | 粗骨料 | 水泥砂浆 |
|---|-------|------|
| 法向刚度/($10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$) | 10 | 1 |
| 切向刚度/($10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$) | 10 | 1 |
| 摩擦因数 | 0.80 | 0.45 |
| 数量百分比/% | 15 | 75 |
| 粒径/mm | 10~40 | 5~10 |

2.3 颗粒接触参数设置

颗粒接触参数主要包括强度、刚度、接触半径等。粗骨料与粗骨料之间采用线性接触模型,粗骨料与水泥砂浆之间采用第 1 类平行键连接模型,水泥砂浆与水泥砂浆之间采用第 2 类平行键连接模型。平行键连接模型可以设想成一系列具有恒定法向刚度和切向刚度的弹簧均匀分布在接触平面内,中心位于接触点[19]。平行键模型能够同时传递力和力矩,力和力矩可以分解为法向和切向 2 个方向,接触部分可以用半径为 R 、高为 L 的圆柱体来描述(图 7),具体参数见表 2。

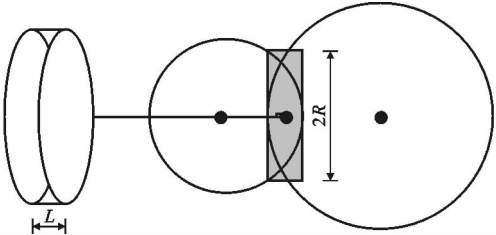


图 7 平行键连接模型

Fig. 7 Parallel Key Connection Model

表 2 颗粒之间的接触参数

Tab. 2 Contact Parameters Between Particles

| 接触参数 | 粗骨料-水泥砂浆 | 水泥砂浆-水泥砂浆 |
|---|----------|-----------|
| 法向强度/($10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$) | 200 | 6 |
| 切向强度/($10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$) | 40.0 | 1.2 |
| 法向刚度/($10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$) | 5 | 2 |
| 切向刚度/($10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$) | 10 | 5 |
| 接触半径/mm | 0.5 | 0.3 |

2.4 静水压力场设置

实际工程中灌注标高处土层已被完全开挖,且坑底被 1 m 分仓墙分成若干区域。灌注过程中,并没有进行降水措施,坑内外水位始终保持一致,基坑底部无渗流现象,因此灌注压力场即为重力场和净水压力场,后者由地下水位高低决定。灌注过程中,通过设置三维压力墙来使围压恒定,墙体之间是没有相互作用的,视觉上墙体发生接触、贯穿,但是墙体之间没有接触力,最终通过改变围压墙高度 h (水位高度) 来施加不同的围压(图 8)。

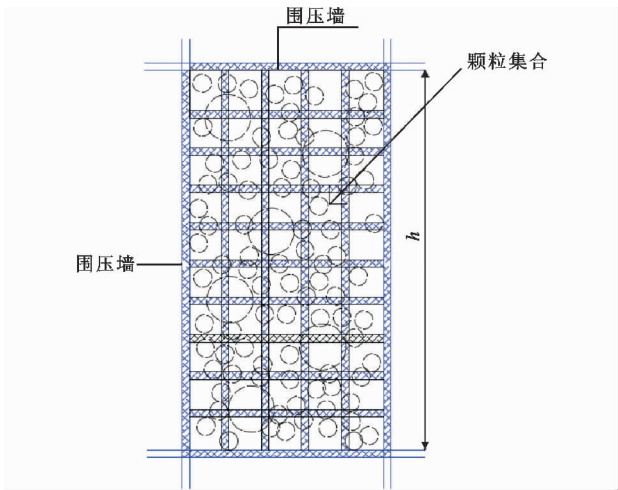


图 8 压力场设置
Fig. 8 Pressure Field Setting

3 水下混凝土封底数值模拟

根据施工方案,建立一个尺寸为 $17\text{ m} \times 12\text{ m}$ 的“容器”,导管长度为 40 m 。模型底部颗粒用以模拟坑底 8 m 厚的卵石层(粒径为 $5\sim 8\text{ cm}$) ;料斗中颗粒代表混凝土,竖向框架代表地下水位产生的水压力。设置基坑边墙法向及切向刚度为 $1 \times 10^9\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。图 9 为添加地下水位线后模型初始图。输入颗粒参数(表 1,2)后在每个料斗生成 $50\,000$ 个颗粒,每根导管生成 $20\,000$ 个颗粒。完成模型初始化设置。

3.1 单导管水下灌注模拟

在中心放置单根导管,模拟单导管水下灌注的扩散半径。导管内充满混凝土颗粒模拟首灌量,得到单根导管水下灌注模型及扩散半径(图 9)。

结果表明:单导管水下灌注混凝土大致呈锥体,首灌结束后导管口埋置在首灌锥体内,后续混凝土颗粒不断灌注将首灌混凝土向上顶起,呈现锥体状;两侧混凝土的厚度不足,故在水下布置导管时要充分考虑导管的扩散半径对灌注面积的影响。将导管

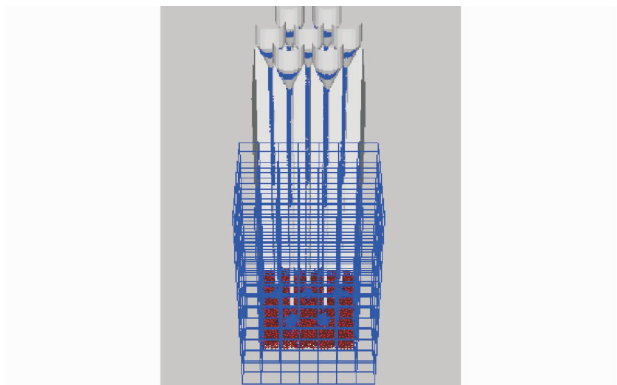


图 9 混凝土水下灌注模型
Fig. 9 Concrete Underwater Filling Model

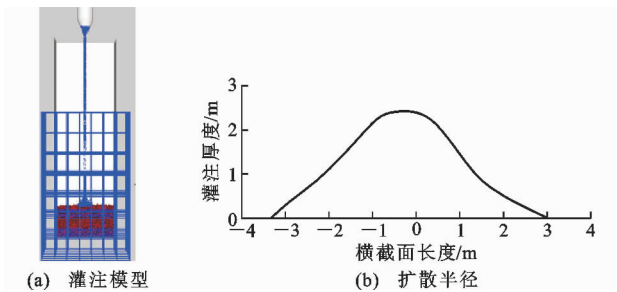


图 10 单导管灌注模型及扩散半径
Fig. 10 Single Tremie Filling Model and Diffusion Radius

扩散模型放在坐标系中可知,扩散半径达到要求的 3 m 。因此,为满足灌注封底厚度要求,应控制导管间距在 3 m 以内,并严格按照灌注量来进行灌注,亦可以进行一定量的超灌以满足封底要求。

3.2 实际施工水下灌注模拟

建立 7 套导管和装载混凝土的料斗。完成整个灌注过程视频录制,截取几个典型截面观察灌注过程(图 11)。封底完成时的仓位中心线纵向剖面见图 12。

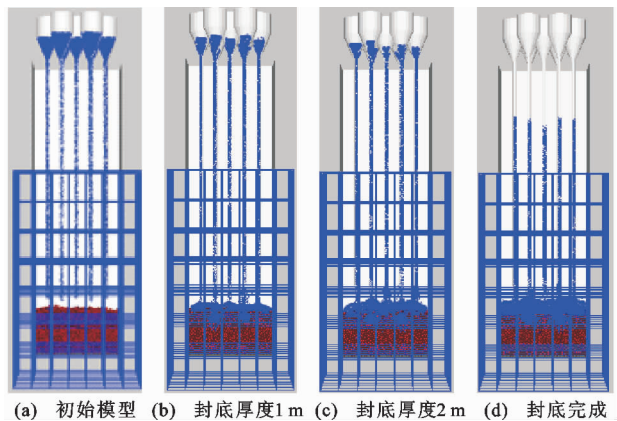


图 11 模型运行过程
Fig. 11 Model Operation Process

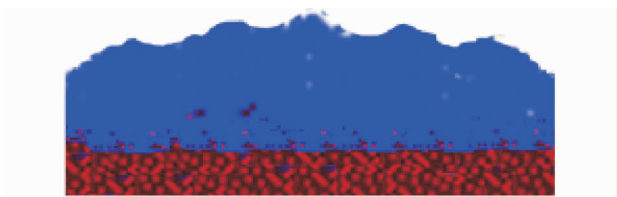
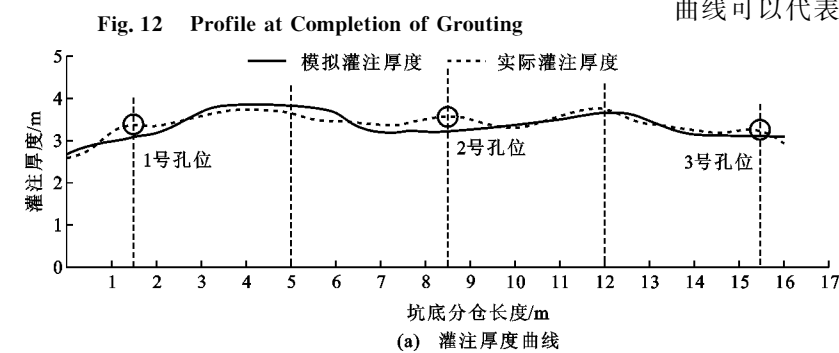
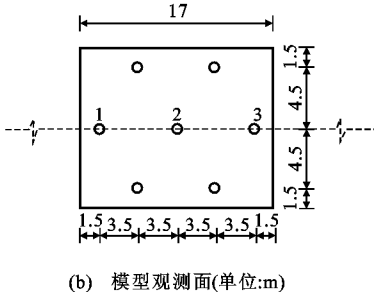


图 12 灌注完成时剖面图



(a) 灌注厚度曲线



(b) 模型观测面(单位:m)

图 13 实测和模拟灌注厚度对比

Fig. 13 Comparison of Measured and Simulated Filling Thickness

结果表明:①PFC 能够直观地模拟整个施工过程,对各时段工况进行模拟可以提前验证施工方案的可行性,预测可能存在的问题并及时进行修正;②管口处有混凝土堆积,边墙处堆积相对较少,封底高度不够,在此处可能存在渗水甚至漏水的情况,另外,由于卵石层透水率较大,导致部分混凝土下渗封底厚度不够;③模拟结果与实测曲线走向基本吻合,最大误差为 0.3 m,平均灌注厚度均为 3.5 m,验证了模型参数的合理性,可以作为基本模型进行后续研究。

4 水下混凝土灌注厚度影响因素

4.1 导管布置

对面积固定的基坑进行水下混凝土灌注需要根据扩散半径来布置导管的位置。为验证扩散半径对封底厚度的影响,按照 7 套导管的布置原则,分别模拟 5 套、6 套导管灌注方案,如图 14 所示。

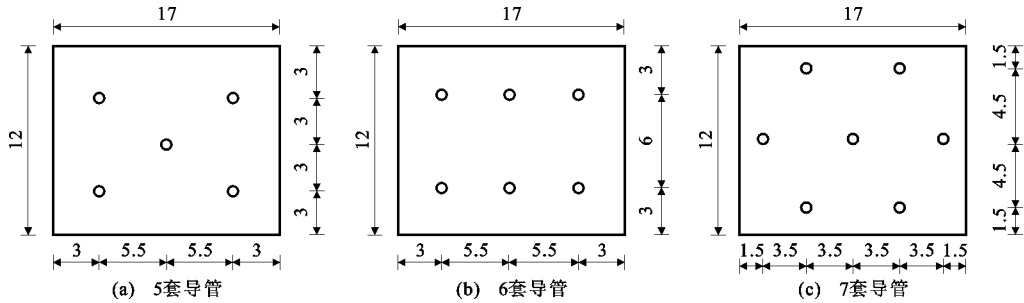


图 14 导管排布(单位:m)

Fig. 14 Arrangement of Tremies (Unit:m)

选取模型穿过 1,2,3 号孔位的剖面图,根据运行结果绘制实测与模拟平整度曲线。图 13 为料斗中颗粒完全灌注时,模型底部混凝土实时厚度曲线,虽然散粒体排列具有随机性,但粗骨料粒径为 10~40 mm,水泥砂浆粒径为 5~10 mm,远小于 3 m 左右的平均灌注厚度,因此单次计算完成时实时厚度曲线可以代表实际工程中的宏观厚度特征。

建模过程中,除导管数量不同外,混凝土参数、灌注速度、料斗大小等完全相同,全程记录灌注过程。图 15 为不同导管数量运行结果,包括初始状态、封底厚度 1 m、封底厚度 2 m、封底完成时的瞬时状态。选取图 13(a)中虚线位置为观测线,沿单仓长度方向,将灌注平面分为 5 个区间,绘制封底厚度曲线,如图 16 所示。

分析图 16 可知:

(1)区间 I, V 靠近边墙,5,6 套导管位置距离分仓墙较远,因此灌注厚度明显不足;区间 II, IV 内,由于 5,6 套灌注方案远离管口,发生明显凹陷现象;区间 III 内 5,6 套导管靠近管口,堆积现象明显。

(2)5 套导管方案由于导管数量少,间距大,部分颗粒无法相互作用,在导管口出现明显堆积现象,灌注厚度明显不足;6 套导管由于是 2 排布置,2 排导管之间间距较大,堆积现象在导管布置处极为明显,厚度变化起伏较大;7 套导管布置间距适中,布

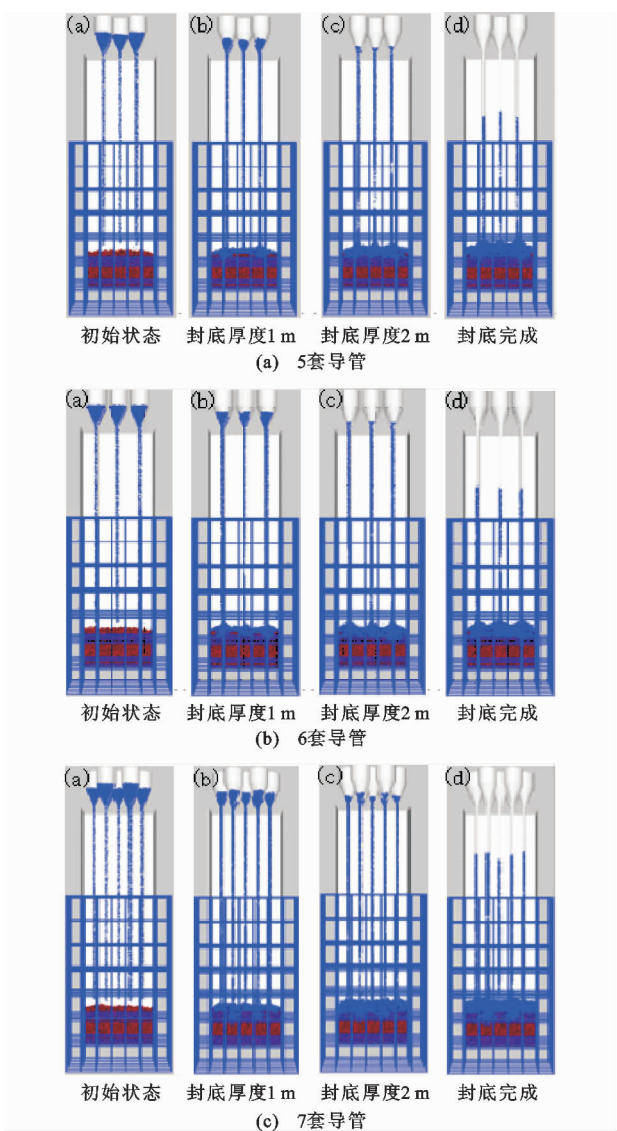


图 15 不同导管数量运行结果

Fig. 15 Operational Results of Different Tremie Numbers

置均匀,相对于其他 2 组厚度更加平整,没有明显凹陷和堆积现象,平均灌注厚度达 3.2 m,高于其他 2 组的平均灌注厚度 2.9、3.0 m。因此针对本工程,7 套导管灌注水下混凝土封底效果最好。

(3)导管布置加密后,会形成扩散半径重合区域,区域内存在厚度叠加情况,颗粒与颗粒间的接触在计算循环中交替应用牛顿第二定律与力-位移定律并且不断更新颗粒的位置^[20],粒径较小的颗粒运动比较快,优先填充到孔隙中,颗粒间的孔隙度减小(对应颗粒重排),颗粒内外摩擦力急剧增大,流动更加困难,直到流动停止。颗粒运动达到平衡,单元大面积叠合,以保证重叠区域的厚度。

(4)导管布置越密,平整度越好,越可保证灌注厚度,但是在实际工程中要考虑成本及施工难度等情况,对于平整度不够的位置可以通过潜水员再次找平。考虑施工成本,8 套以上导管不适合本工程。

4.2 地下水位

原始地下水位为 19 m,设计 5 个不同地下水位线模型(17,18,19,20,21 m)来研究地下水位对封底效果的影响。在原 7 套导管模型基础上只改变地下水位高度,分别模拟 5 种情况下的水下混凝土灌注过程(图 17)。同样选取穿过 1,2,3 号孔位的模型底部剖面,5 种模拟灌注厚度结果见图 18。

分析可知:

(1)地下水位标高为 17 m 时,水下混凝土灌注封底较平整,无明显堆积或凹陷现象;地下水位标高为 21 m 时,曲线起伏较大,导管口以及两孔口中间出现大量堆积,边墙处封底厚度明显不足,封底效果不佳。

(2)水位越高,颗粒运动受阻越明显,在导管布置处越易堆积,反之则越容易扩散;因此在施工过程中,要根据地下水位的高低选取流动性不同的混凝土材料。

(3)地下水位越低,封底效果越好,灌注厚度越均匀,所以在条件允许范围内可适当降低地下水位,这样既可以保证施工效果,也能降低水下混凝土的配比要求;在特殊施工环境中(比如地下水丰富,有

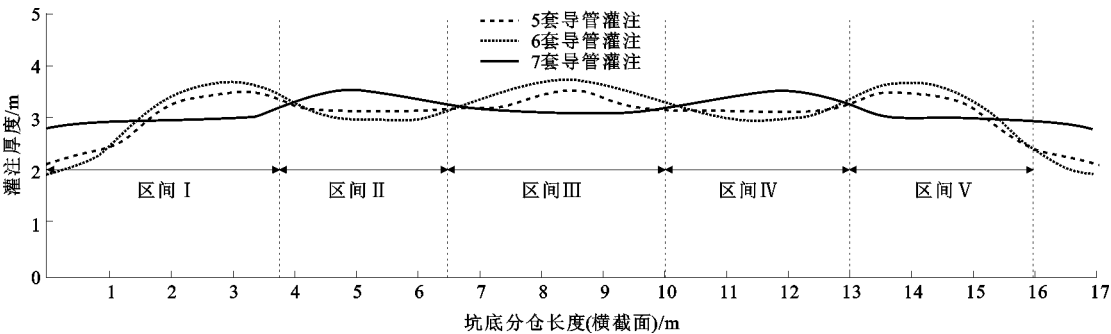


图 16 封底厚度变化

Fig. 16 Cover Thickness Variation

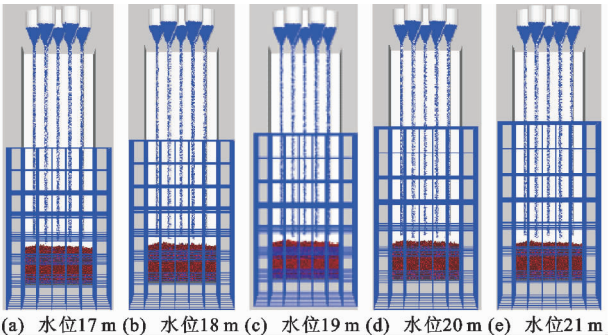
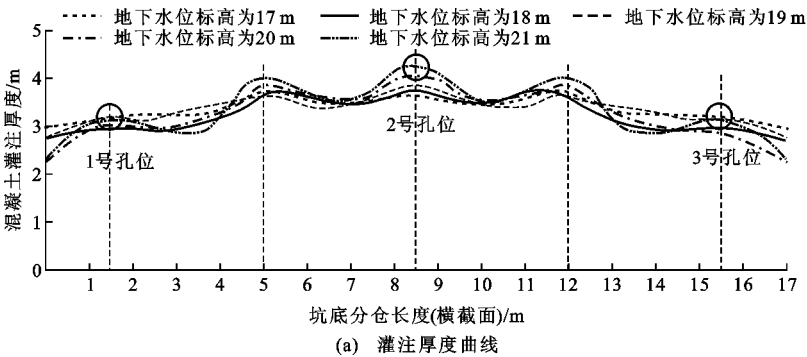
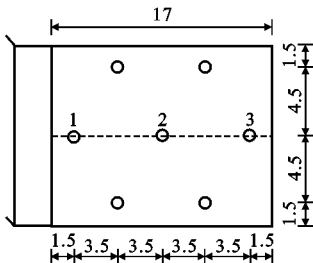


图 17 不同水位初始模型

Fig. 17 Initial Models of Different Water Levels



(a) 灌注厚度曲线



(b) 模型观测面(单位:m)

图 18 各水位封底厚度变化

Fig. 18 Change of Cover Thickness of Each Water Level

管位置才能保证封底厚度。针对本文工程,5 套导管效果不佳,边墙厚度不够。6 套导管间距较大,堆积现象明显,7 套导管能够保证均匀的封底厚度。

(3)地下水位高低影响水下混凝土灌注,水位越低,封底平整度越好;水位越高,厚度起伏越大;混凝土颗粒随地下水位升高流动性变差,更容易堆积,所以在高地下水位工程,要采用流动性更好的混凝土,或者适当降低地下水位来确保灌注质量。

(4)水下混凝土封底模型的建立为计算混凝土灌注参数,动态展示水下混凝土流动,可视化模拟水下灌注混凝土全过程提供了重要的依托工程和数值基础。

参考文献:

References:

[1] 付祖良. 钻孔灌注桩水下混凝土灌注技术研究与应用 [D]. 武汉:华中科技大学,2006.
FU Zu-liang. Research and Application on the Technology of Pouring Concrete of Bored Piles Under Water[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2006.

[2] 杨光煦. 水下灌注混凝土[M]. 北京:水利电力出版社,1983.

越流补给等,无法降低地下水位),可以适当提高水下混凝土的流动性及和易性等保证封底质量。

5 结 语

(1)模型计算结果显示,对于永定门外站富水砂卵石地层,在不降低地下水位情况下,采用 7 套导管布置方案进行水下混凝土灌注,能够大致满足水下混凝土设计规范要求。可适用于类似工程的方案设计及风险预测。

(2)导管的布置决定混凝土封底质量。根据 3 m 左右的单导管混凝土水下扩散半径,合理布置导

YANG Guang-xu. Underwater Concrete Pouring [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press,1983.

[3] 李欠秋. 加强建筑施工中钻孔灌注桩技术的研究[J]. 城市建筑,2013(8):58.
LI Qian-qiu. Strengthening Research on the Technology of Bored Pile in Construction[J]. Urbanism and Architecture,2013(8):58.

[4] 仲伟秋,张志伟,江明珠. 水下不分散混凝土短柱抗震性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(1):49-52,90.
ZHONG Wei-qiu, ZHANG Zhi-wei, GANG Ming-shu. Experiment on Seismic Performance of Non-dispersible Underwater Concrete Short Columns [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2011,28(1):49-52,90.

[5] 李继业,刘福胜. 新型混凝土实用技术手册[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
LI Ji-ye, LIU Fu-sheng. Handbook of New Concrete Practical Technology[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2005

[6] 刘 建,彭振斌. 高强砼灌注桩新工艺及其应用[J]. 中南工业大学学报,1998(4),29(4):36-318.
LIU Jian, PENG Zhen-bin. High Strength Concrete

- Grouting Pile and Its New Application Technology [J]. Journal of Central South University of Technology, 1998, 29(4): 316-318.
- [7] 祝成功, 王 威. 导管法浇筑桩基混凝土的施工要点 [J]. 水利科技与经济, 2004, 10(3): 189.
ZHU Cheng-gong, WANG Wei. Key Points for Construction of Pile Foundation Concrete by Pipe Method [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2004, 10(3): 189.
- [8] 林钦生. 水下浇筑混凝土配合比的确定 [J]. 混凝土, 1992(3): 38-46.
LIN Qin-sheng. Determination of the Proportion of Underwater Pouring Concrete [J]. Concrete, 1992(3): 38-46.
- [9] 贾少卿. 导管法灌注水下抗分散型混凝土的研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
JIA Shao-qing. Catheter Perfusion Non-dispersible Underwater Concrete Research [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2015.
- [10] 王晓梅, 阳小峻, 李芳伟. 鄂东长江大桥钻孔灌注桩水下混凝土施工技术 [J]. 混凝土, 2009(11): 92-93, 97.
WANG Xiao-mei, YANG Xiao-jun, LI Fang-wei. Construction Technology of Underwater Concrete in Bored Pile of Eastern Long River Bridge in Hubei [J]. Concrete, 2009(11): 92-93, 97.
- [11] 李宝平, 杨兆民. 地下室钢筋混凝土裂缝控制 [J]. 建筑科学与工程学报, 2002, 19(4): 10-13.
LI Bao-ping, YANG Zhao-min. Control over Cracks of Basement Reinforced Concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2002, 19(4): 10-13.
- [12] 郭宏智. 导管法水下灌注用砼的配料和配合比设计 [J]. 西部探矿工程, 2003(7): 145-147.
GUO Hong-zhi. Design of Mix and Proportion of Concrete for Underwater Grouting by Conduit Method [J]. West-China Exploration Engineering, 2003(7): 145-147.
- [13] 杨文渊, 徐 犇. 公路工程质检工程师手册 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
YANG Wen-yuan, XU Ben. Handbook of Highway Engineering Quality Inspection Engineer [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [14] 周 健, 池 永, 池毓蔚, 等. 颗粒流方法及 PFC2D 程序 [J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 271-274.
ZHOU Jian, CHI Yong, CHI Yu-wei, et al. The Method of Particle Flow and PFC2D Code [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 271-274.
- [15] 杜 娟. 二维颗粒流程序 PFC^{2D} 特点及其应用现状综述 [J]. 安徽建筑大学学报, 2009, 17(5): 68-70.
DU Juan. The Overview of Characteristics and Applications of PFC^{2D} [J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2009, 17(5): 68-70.
- [16] 徐 泳, 孙其诚, 张 凌, 等. 颗粒离散元法研究进展 [J]. 力学进展, 2003, 33(2): 251-260.
XU Yong, SUN Qi-cheng, ZHANG Ling, et al. Advances in Discrete Element Methods for Particulate Materials [J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(2): 251-260.
- [17] 陈 俊, 张 东, 黄晓明. 离散元颗粒流软件 (PFC) 在道路工程中的应用 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
CHEN Jun, ZHANG Dong, HUANG Xiao-ming. Application of Particle Flow Code (PFC) in Road Engineering [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [18] MUSER M. Valentin L. Popov; Contact Mechanics and Friction; Physical Principles and Applications [J]. Tribology Letters, 2010, 40(3): 395-395.
- [19] CUNDALL P A. PFC2D User's Manual (Version 3.1) [M]. Saint Paul: Itasca Consulting Group Inc, 2004.
- [20] 王 涛, 吕 庆, 李 杨, 等. 颗粒离散元方法中接触模型的开发 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2): 4040-4045.
WANG Tao, LU Qing, LI Yang, et al. Development of Contact Model in Particle Discrete Element Method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 4040-4045.