

引文格式:简文浩,师文豪,邓伟,等.大直径沉井水下灌注封底层起伏特征模拟分析[J].建筑科学与工程学报,2025,42(5):200-208.  
JIAN Wenhao, SHI Wenhao, DENG Wei, et al. Simulation analysis of fluctuation characteristics of underwater perfusion seal bottom of large diameter caisson[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(5): 200-208.

DOI:10.19815/j.jace.2023.11063

# 大直径沉井水下灌注封底层起伏特征模拟分析

简文浩<sup>1,2</sup>,师文豪<sup>1,2</sup>,邓伟<sup>1,3</sup>,王源<sup>1,2</sup>,樊绿叶<sup>2,4</sup>

(1. 苏州科技大学 土木工程学院,江苏 苏州 215011; 2. 昆山市地下空间技术研究院有限公司,江苏 苏州 215337;  
3. 中建国际建设有限公司,江苏 苏州 215000; 4. 昆山市建设工程质量检测中心有限公司,江苏 苏州 215337)

**摘要:**为解决沉井水下灌注混凝土封底问题,依托昆山森林公园地下筒仓式停车库沉井工程,基于PFC离散元方法构建了沉井水下灌注混凝土数值模型,模拟了沉井水下灌注混凝土封底过程;通过引入相对起伏度参数,量化分析了封底层的起伏特征,揭示了导管布置方案、地下水位高度、地下水温度等因素对封底层起伏特征的影响规律。结果表明:水下灌注过程中,通过逐步提升导管法模拟混凝土封底过程是可行的;同等条件下,导管布置越密集,封底层相对起伏度越小,起伏特征越不明显;地下水位越高,封底层起伏越大,水位越低,封底层越均匀;工程允许范围内,适当降低地下水位有利于降低封底的相对起伏度;地下水温度变化对封底层相对起伏度影响较小。

**关键词:**大直径沉井;封底层起伏特征;数值模拟;水下混凝土灌注

中图分类号:TU943

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)05-0200-09

## Simulation analysis of fluctuation characteristics of underwater perfusion seal bottom of large diameter caisson

JIAN Wenhao<sup>1,2</sup>, SHI Wenhao<sup>1,2</sup>, DENG Wei<sup>1,3</sup>, WANG Yuan<sup>1,2</sup>, FAN Lyuye<sup>2,4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China;  
2. Kunshan Underground Space Technology Research Institute Co., Ltd, Suzhou 215337, Jiangsu, China;  
3. CSECEC International Construction Co., Ltd. Suzhou 215000, Jiangsu, China; 4. Kunshan Construction Engineering Quality Inspection Center Co., Ltd, Suzhou 215337, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to address the problem of underwater concrete perfusion seal bottom of caisson, relying on the caisson project of underground silo parking garage in Kunshan Forest Park, a numerical model of underwater concrete perfusion of caisson was constructed based on the discrete element method of PFC, and the process of underwater concrete perfusion seal bottom of caisson was simulated. By introducing the relative fluctuation parameter, the fluctuation characteristics of seal bottom layer were quantitatively analyzed, and the influence laws of conduit arrangement scheme, height of groundwater table, and temperature of groundwater on the fluctuation characteristics of seal bottom layer were revealed. The results show that it is feasible to simulate the concrete bottoming process by gradually raising conduit method during underwater perfusion. Under the same condition, the denser the conduit arrangement is, the

smaller the relative fluctuation of seal bottom layer is, and the less obvious the fluctuation characteristics are. The higher the groundwater table is, the greater the fluctuation of seal bottom layer is, the lower the water level is, and the more uniform the seal bottom layer is. Within the allowable scope of project, appropriately lowering the groundwater table is helpful to reduce the relative fluctuation of seal bottom. The change of groundwater temperature has a small influence on the relative fluctuation of seal bottom layer.

**Key words:** large diameter caisson; fluctuation characteristic of seal bottom; numerical simulation; underwater concrete perfusion

**Author resume:** SHI Wenhao(1988-), male, PhD, associate professor, E-mail: shiwenhaoneu@126.com.

## 0 引言

城市建筑密集区域可开发土地资源相对不足,传统停车库已无法有效缓解“停车难”这一问题。利用城市内部狭小地块空间,开发地下空间资源,建设地下筒仓式立体停车库,有望成为解决城市停车难问题的创新途径<sup>[1-2]</sup>。采用不排水沉井法是建设筒仓式地下车库的首选工法,对于大直径沉井,水下封底是沉井施工中的关键难题之一。因此,研究大直径沉井水下封底问题,对于确保沉井施工安全、优化沉井施工工艺等具有重要的实际意义。

沉井封底的成功与否关系到整个工程的质量安全,特别是当沉井工程采用水下封底方案时,将面临更多问题,若处理不当,可能会导致沉井发生二次下沉或造成潜在的底板渗漏水问题等。在封底的施工方法和技术要点方面,张振光等<sup>[1-2]</sup>以南京建邺区沉井式地下停车库为例,对沉井下沉过程、素混凝土封底过程进行了详细阐述。Luo<sup>[3]</sup>以某地铁深基坑工程为例,得到封底混凝土厚度与基坑开挖深度成正比,基坑抗浮方案的选择非常关键。付小莲等<sup>[4-7]</sup>对桥梁基础水下封底施工方法及技术要点进行了详细叙述,总结了一定的施工经验,可为类似工程施工提供借鉴。

目前有关水下封底数值模拟的研究,主要集中在水下封底施工后,封底层受力状况以及封底层施工对基坑本体的影响,包括坑底渗水情况、支护结构变形等。宋建禹<sup>[8]</sup>依托福州市地铁 2 号线厚庭站一桔园洲站区间风井,采用 Visual Modflow 对临江高承压水超深基坑水下素混凝土板进行了分析,模拟结果表明其受力状态主要表现为受弯和受剪。帅玉兵等<sup>[9]</sup>为验证在盾构隧道内机械化废水泵房施工工艺的可行性以及泵房封底混凝土的可靠性,采用三维有限差分软件 FLAC3D 对其封底情况进行了模

拟研究,模拟结果显示封底混凝土满足设计要求,足以抵抗施工中的水压而不发生破坏,验证了施工工艺的可行性。尚桌等<sup>[10-11]</sup>分别依托实际工程,利用 MIDAS GTS 和 FLAC3D 对工程坑底加固、坑内降水及开挖进行模拟,并将数值计算结果与现场实测数据进行对比分析,结果表明封底加固能够有效抑制地下水向坑内渗流,并减少坑底隆起量。

除有限差分法和有限元法等连续介质方法外,离散元法也是一种常用的数值模拟方法,且凭借其可以更真实反映颗粒材料的形态特征和接触特性以及形态可视化的优点<sup>[12-14]</sup>,已在模拟滑坡、车辙形态等问题中取得了较好的应用效果。Chen 等<sup>[15]</sup>利用离散元方法分析了滑坡的变形行为和动力学特征,模拟了滑坡形状与堆积特征,模拟结果与滑坡的实际地形特征吻合较好。王泽华等<sup>[16]</sup>借助 PFC3D 模拟了滑坡与建筑物相互作用的过程,观察并记录了破坏形式,分析了滑坡冲击强度对建筑物破坏形式的影响规律。Zhong 等<sup>[17]</sup>应用 PFC3D 建立多孔沥青路面虚拟车辙试验,从骨料级配、温度、车辆加速度等角度对多孔沥青路面的抗车辙性能进行研究,结果表明 PFC3D 建立的虚拟模拟仿真结果与室内试验结果吻合较好。

现有文献大多是针对沉井施工工艺的优化与改良,以及在水下封底施工后封底层受力状况和封底层施工对沉井本体影响,包括井底渗水情况、支护结构变形等,缺乏对封底层起伏形态的研究。本文依托昆山市森林公园配套筒仓式停车场沉井工程,采用 PFC3D 数值软件建立了水下封底层灌注模型,实现了水下混凝土灌注全过程的可视化与封底层宏观研究,为今后类似的工程及方案提供设计思路及风险研判参考。

## 1 工程概况

工程项目位于江苏省昆山市,为森林公园配套

停车库,项目占地面积约 375 m<sup>2</sup>,地上部分建筑面积 82.7 m<sup>2</sup>,地下建筑面积 1 500 m<sup>2</sup>;地上一层为地下车库升降机间,总高度 11 m,利用屋顶空间放置通风设备等,地下 4 层、地下一层层高 3.4 m,地下 2~4 层层高 2.15 m,覆土 0.6 m,地下总深度 13.85 m。

沉井工程刃脚底标高为 -17.35 m,锁口标高 -0.7 m,实际开挖至刃脚深度为 16.65 m,井壁标五段结构施工完成后进行下沉,其余上部结构同井内结构一起施工,达到设计深度后进行触变泥浆置换和封底。水下土方开挖完成后进行碎石层摊铺,碎石层厚度为 500 mm,并在沉井中部设置减压井;沉井封底采用 C25 水下混凝土导管法进行浇筑;底部钢筋混凝土底板采用 C35 混凝土,其抗渗等级为 P8。基于《给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程》,通过计算,水下封底混凝土厚度需要达到 2.3 m。

竖井穿越地层从上到下的顺序大致分为 3 层:①杂填土层,含杂填土层和素土层,厚度为 1.6~1.9 m;②淤泥质黏土层,厚度为 4.7~5.2 m;③粉细砂层,含粉质黏土、粉土、粉砂层,厚度为 16.2~17.5 m。地层的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 地层物理力学参数

Table 1 Stratigraphic physical and mechanical parameters

序号	土层	压缩模量/ MPa	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 C <sub>cp</sub> /kPa	渗透系数 K/ (cm·s <sup>-1</sup> )
1	杂填土	5.00	18.00	8.0	2.0×10 <sup>-5</sup>
2	黏土	7.63	19.58	13.8	3.0×10 <sup>-6</sup>
3	粉质黏土	5.26	18.74	15.9	5.0×10 <sup>-6</sup>
4	粉土	7.05	18.54	8.7	8.0×10 <sup>-5</sup>
5	粉砂	9.31	18.51	4.0	4.0×10 <sup>-4</sup>

昆山市年平均气温为 15.9℃,平均气温的年度变化为 3.2℃,最热月份为 7 月,平均气温为 28.2℃,最冷月份为 1 月,平均气温为 3.6℃,气温的平均年温差为 24.6℃。

根据勘察资料,本工程场地孔隙潜水主要赋存于杂填土、浅部土层中,主要受大气降水入渗及地表水的侧向补给,以地面蒸发和侧向径流为主要排泄,水位随季节变化较明显。微承压水主要赋存于粉砂层中,富水性及透水性较好,主要呈侧向径流、越流补给及侧向径流排泄。

## 2 基于坍落度试验的混凝土细观参数标定

混凝土是由水泥、粗骨料、细骨料、水和外加剂

拌合而成的颗粒集合体。为了简化模型,将混凝土视为由粗骨料和水泥砂浆两类颗粒组成的颗粒混合物<sup>[18]</sup>,分别用两种不同属性的颗粒材料来表示,如图 1 所示。对颗粒模型做出如下假设:①组成混凝土的各个细观材料都视作理想均匀、各向同性的弹性材料;②各单元都视作无变形的刚体,各介质之间黏结完好,允许接触行为重叠,但重叠量远远小于颗粒的半径;③忽略骨料形状的影响。

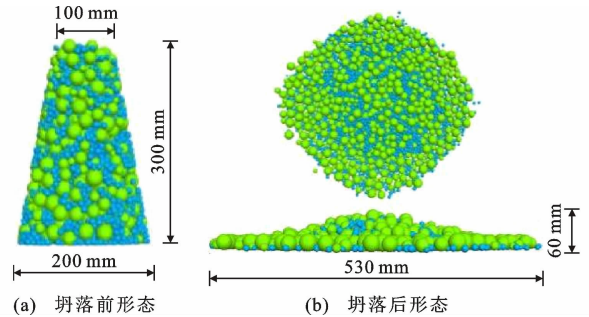


图 1 混凝土坍落度试验离散元模拟

Fig. 1 Discrete element simulation of concrete slump test

为了确定新拌混凝土离散元模型的微观参数,建立了混凝土坍落度试验的离散元模型。依据现场坍落度试验测得混凝土坍落度和扩展度两个流动性指标,通过不断调整新拌混凝土离散元模型的参数,进行混凝土细观参数标定,图 2 给出了 6 组离散元模拟和物理试验结果。从图 2 可以看出,离散元模拟与物理试验得到的混凝土坍落度、扩展度相对误差分别为 1.0%、3.5%,混凝土坍落度约为 240 mm,扩展度约为 530 mm,数值模拟结果和试验结果基本吻合,表明该离散元模型可以用于模拟混凝土灌注行为,混凝土细观参数标定结果如表 2、3 所示。

## 3 沉井水下灌注混凝土封底过程数值模拟

### 3.1 模拟方案

根据工程实际条件,建立直径为 21 m、深度为 17 m 的圆筒沉井,使用 9 套导管同时灌注的模拟方法等效替代实际现场单导管移动式灌注,确保结果相近的情况下提升计算速度,导管长度为 16.7 m,直径为 300 mm(图 3)。设置模型边界(井壁)法向及切向刚度为 1×10<sup>9</sup> N·m<sup>-1</sup>。初始地下水位设置为 12 m,水温为 22℃,对应的动黏滞阻力系数  $\eta$  为 0.963,基坑内外水位保持一致,设置为 12 m。这种情况下,灌注压力场主要包括重力场和净水压力场,净水压力场受地下水位高度影响。通过设置三维压力墙使围压保持恒定,墙体之间无相互作用和

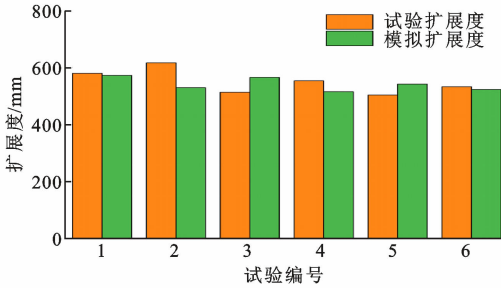
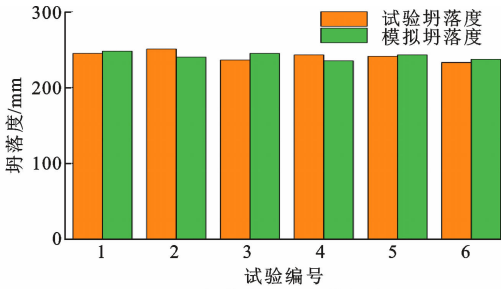


图 2 现场坍落度试验与模拟结果

Fig. 2 Field slump test and simulation results

表 2 颗粒微观参数

Table 2 Particle microscopic parameters

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	0.25	0.10
数量百分比/%	20	80
粒径/mm	10~25	5~10

表 3 颗粒间接触参数

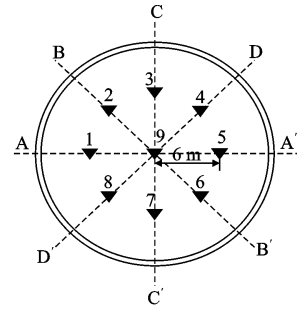
Table 3 Interparticle contact parameters

接触类型	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/( $10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	10	5
接触半径/mm	0.5	0.3

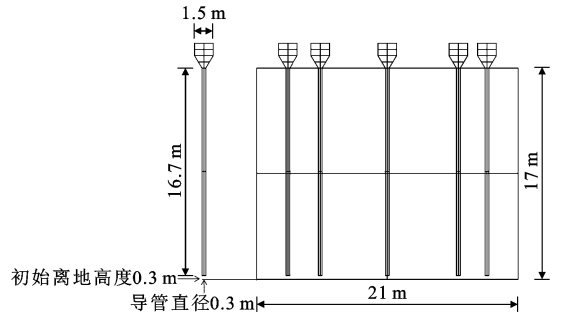
接触力,通过改变压力墙高度  $h$  施加不同的围压。

在沉井中心设置一单导管,通过导管内充满的颗粒模拟首灌灌注混凝土量,模拟单导管时水下灌注混凝土扩散半径,并由此确定导管布置间距的最大距离。

根据本工程封底施工方案,导管竖直深入水面以下,根据导管出口距离沉井底面高度的不同,将整个灌注过程离散为 4 个状态,每个状态下灌注混凝土达到稳定后,通过提升导管进入下一状态。状态 1~4 对应的导管出口距离沉井底面的垂直高度分别为 0.3、1.2、1.7、2.2 m,如图 4 所示。



(a) 导管灌注点位平面图



(b) 模型侧视尺寸图

图 3 水下混凝土灌注模型

Fig. 3 Underwater concrete perfusion model

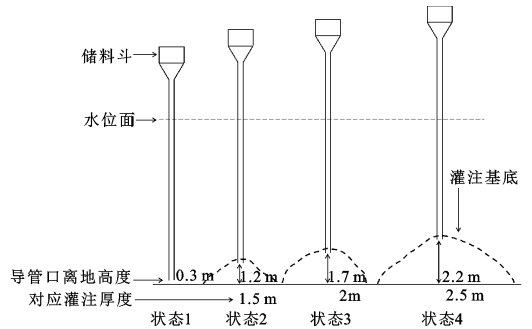


图 4 灌注过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of perfusion process

### 3.2 模拟结果分析

#### 3.2.1 单导管水下灌注混凝土形态特征

单导管水下灌注混凝土模拟结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,随着灌注混凝土颗粒的不断增多,单导管时水下混凝土大体呈现锥体状,中间混凝土颗粒不断堆叠的同时顶部颗粒缓慢向两侧移动,两侧混凝土颗粒厚度不足。因此,在布置导管浇筑点位时要特别注意两导管之间的间距。将单导管时水下混凝土的堆叠剖面图放入坐标系内可知,混凝土扩散半径达到 6 m(图 6),因此,为保证工程质量,满足封底厚度要求,任意两导管之间的间距应控制在 6 m 以内。

#### 3.2.2 多导管水下灌注封底层起伏特征

多导管水下灌注模拟结果如图 7 所示。由图 7 可知,在导管口离地 1.2 m 且水下灌注混凝土厚度

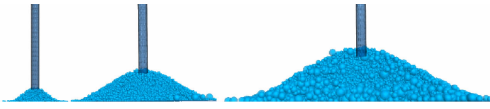


图5 单导管灌注混凝土形态演变

Fig. 5 Evolution of concrete morphology in single conduit perfusion

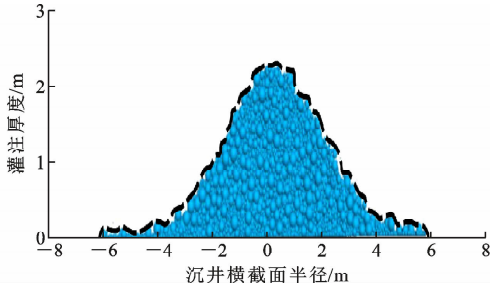


图6 单导管灌注扩散半径及轮廓示意图

Fig. 6 Schematic diagram of single conduit perfusion diffusion radius and profile

达 1.5 m 时,三导管水下灌注混凝土呈现明显的 3 个锥体状,两导管之间的水下混凝土厚度较小。一方面是由于灌注初期导管内不断有混凝土颗粒进行补充,水下混凝土在厚度上不断增高;另一方面,灌注初期形成的锥体状水下混凝土自重较轻,在自重作用下向水平方向进行扩展比较有效,此时仅靠混凝土自身的流动性。

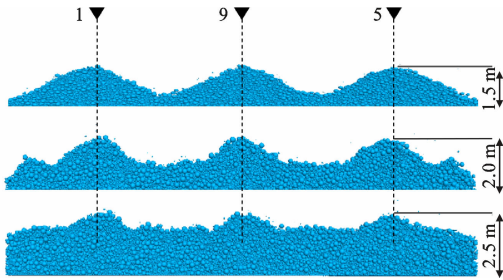


图7 水下灌注混凝土封底过程厚度剖面图

Fig. 7 Thickness profile of underwater concrete perfusion seal bottom process

随着灌注的进行,导管口离地 2.2 m 且灌注厚度达到 2.5 m 时,水下混凝土在厚度上的增加速率逐渐减小,两导管之间的水下混凝土厚度逐渐增加,水下混凝土在自身重力作用下向水平方向进行扩散,此阶段灌注过程主要表现为在两导管之间水下混凝土厚度上的增加。当灌注完成时,导管口处有一定的混凝土堆积,而模型边界(井壁)混凝土相对较少(图 8)。

为了对封底层的起伏特征进行定量表征,引入封底层的相对起伏度参数  $\lambda$ ,可表示为

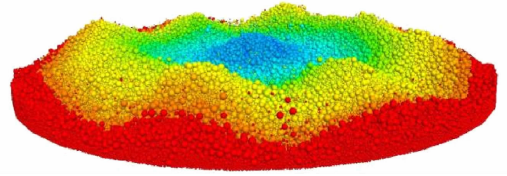


图8 封底层灌注完成

Fig. 8 Completion of seal bottom layer perfusion

$$\lambda = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{\alpha} \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为过圆心截面所能截取的最大导管数; $H_{\max}$  为截面内灌注最高点的高度; $H_{\min}$  为截面内灌注最低点的高度。

$\lambda$  数值越大,起伏特征越明显,反之起伏特征越不明显,封底层越平整。对于该工程项目,根据数值可将  $\lambda$  分为 3 类: $\lambda \geq 0.3$  时,表示相对起伏度大,封底层不平整; $0.1 < \lambda < 0.3$  时,表示相对起伏度一般,封底层平整度一般; $\lambda \leq 0.1$  时,表示相对起伏度小,封底层较为平整。

将模拟的水下混凝土厚度表层起伏形态曲线和现场三维激光扫描得到的封底表层起伏形态面相对高度进行对比,见图 9。由图 9 可知,灌注完成后,水下混凝土在导管口处存在一定堆积,而在模型边界(井壁)和两导管之间的混凝土相对较少,相对高点与相对底层的差值平均为 0.268 m,整个封底层略有起伏。模拟结果与实际灌注曲线走向基本吻合,最大误差为 0.27 m。

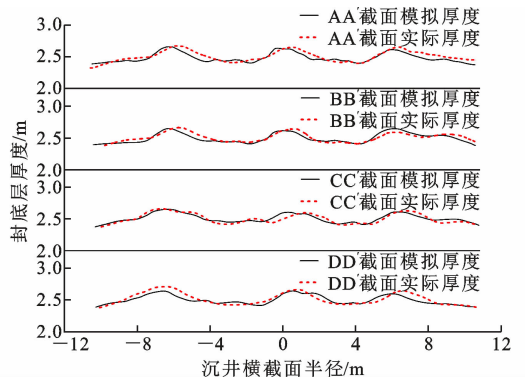


图9 表层起伏形态相对高度对比

Fig. 9 Comparison of relative heights of surface fluctuation patterns

该工程设计要求封底层平均厚度为 2.3 m,在导管口正下方范围内封底层厚度能够满足要求,但靠近井壁处封底层厚度略有不足。考虑到封底层与井壁交界处为施工冷缝,因此,在封底施工时需对井壁附近进行一定量超灌,以满足封底层厚度要求,同时可提高防渗效果。

## 4 封底层起伏特征影响因素分析

基于建立的沉井水下灌注混凝土离散元模型,采用控制单一变量法,进一步研究导管间距、地下水水位高度和地下水温度对封底层起伏特征的影响规律。

### 4.1 导管间距的影响

为研究不同导管间距对水下灌注混凝土的影响,设置两组 5 种模拟方案进行数值模拟,一组为沉井纵剖面最多布置 3 个导管,简称三导管,间距分别设置为 5 m 和 6 m 两种(方案 1、2),另一组为沉井纵剖面最多布置 5 个导管,简称五导管,间距分别设置为 3、4、5 m 三种(方案 3~5),如图 10 所示。

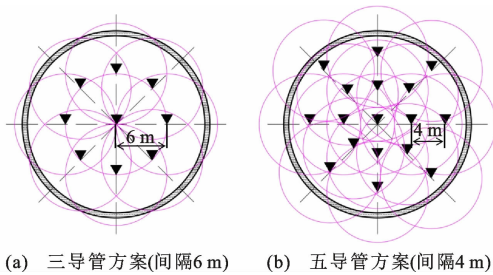


图 10 导管浇注点布置

Fig. 10 Layout of conduit casting points

不同导管间距下的模拟结果如图 11、12 所示。三导管组封底最低厚度均高于 2.36 m,  $\lambda$  均低于 0.15。导管布置方案为五导管时,  $\lambda$  值均低于 0.1 且波动较小,导管间距的改变对  $\lambda$  的影响也逐渐减小,相较于无中心与三导管组更加平整,没有明显的凹陷和堆积,平均厚度达到 2.48 m。井壁处的灌注厚度随着导管间距变小而增加,在五导管间距 5 m 方案中,井壁处最高厚度为 2.596 m。

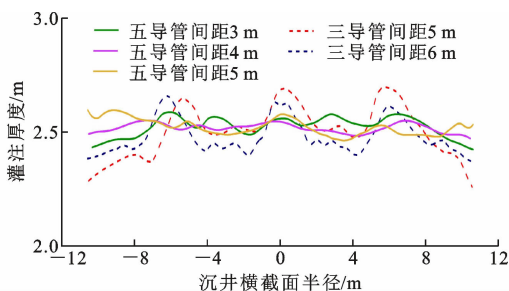


图 11 不同导管间距下水下灌注混凝土厚度曲线

Fig. 11 Thickness curves of underwater perfusion concrete under different conduit spacing

由此可见,导管布置越密集,  $\lambda$  值越低,封底层的平整性越好,导管间距对封底层整体起伏形态的影响越小,导管距井壁越近,井壁处的厚度越高。主要原因是导管布置越密集,导管间距越小,水下混凝土

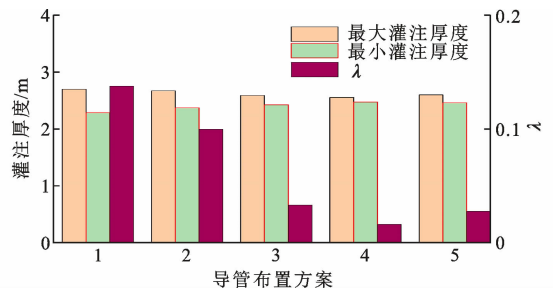


图 12 不同导管间距下最大与最小灌注厚度及  $\lambda$

Fig. 12 Maximum and minimum perfusion thickness and  $\lambda$  under different conduit spacing

土扩散半径重合区域也越大,相邻导管之间的空隙能够得到更多混凝土填充。综合考虑封底层起伏特征和施工效率,该工程水下封底导管建议采用五导管法,管间距以 4 m 最佳。

### 4.2 地下水水位高度的影响

在原模型基础上仅改变地下水水位高度,设置地下水水位高度分别为 8、10、12、14、16 m 五种情况进行数值模拟,以沉井纵剖面 AA' 为例进行分析,模拟结果见图 13、14。

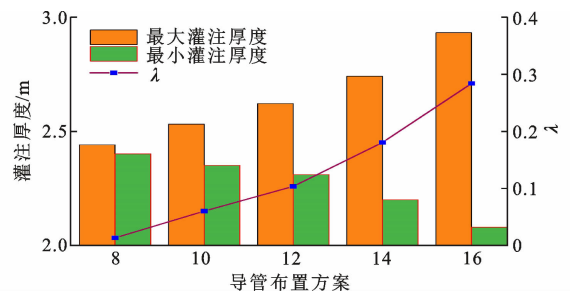


图 13 不同地下水水位高度时最大与最小灌注厚度及  $\lambda$

Fig. 13 Maximum and minimum perfusion thickness and  $\lambda$  at different water table heights

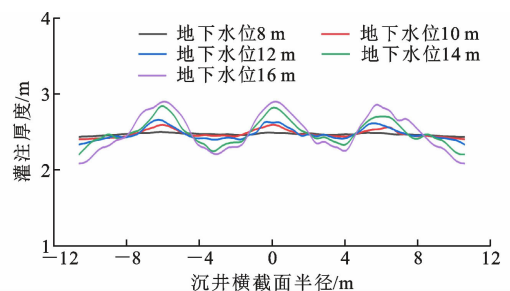


图 14 不同地下水水位高度时水下灌注混凝土厚度曲线

Fig. 14 Thickness curves of underwater perfusion concrete at different water table heights

当地下水水位高度为 8 m 时,  $\lambda$  为 0.013,沉井封底效果较为平整,未出现明显的堆积与凹陷;地下水水位达到 16 m 时,  $\lambda$  为 0.283,截面曲线的起伏较大;观察 1、9、5 号导管口可知,在导管口处出现了大量

混凝土堆积,而在模型边界处的混凝土厚度明显低于另外 4 组,厚度明显不足。因此,地下水位越高,混凝土颗粒越易在导管口处发生堆积,最大灌注厚度增大,混凝土颗粒越不容易扩散至井壁处,最小灌注厚度减小。

随着地下水位高度的增加,水下混凝土最大灌注厚度逐渐增大,最小灌注厚度逐渐减小, $\lambda$  逐渐增大,且随着水位高度增加, $\lambda$  增长的速率也在提高,混凝土颗粒越易在导管口处发生堆积,颗粒越不容易扩散至井壁处。因此,地下水位高度越大,对水下灌注混凝土的平整度越不利。

地下水位越低,封底效果越好,厚度越均匀;在水下封底施工过程中,要根据实际工程的地下水位,选择流动性合适的混凝土材料灌注,并在允许的范围内适当降低地下水位,使水下混凝土平整度更好。

### 4.3 地下水温度的影响

当混凝土在水中发生扩散时,由于附着在混凝土表面的液层与周围其他液层之间存在着相对运动,使混凝土在扩散过程中受到水的黏滞阻力。水的黏滞阻力系数在不同温度下将发生改变,可由公式(2)、(3)得到水的黏滞阻力系数(表 4)。

$$\eta = \eta_0 [1 + B(T - T_0)] \quad (2)$$

$$\eta = \eta_0 \exp\{E_a / [R(T - T_0)]\} \quad (3)$$

式中: $\eta$  为液体的黏滞阻力系数; $\eta_0$  为液体在参考温度  $T_0$  时的黏滞阻力系数; $B$  为温度系数; $E_a$  为黏度与温度之间的能量差; $R$  为常量; $T$  为液体的温度。

表 4 黏滞阻力系数

Table 4 Coefficient of viscosity resistance

温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\eta / (10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s})$	$\eta_T / \eta_{20}$	温度校正系数 $T_D$
8	1.387 0	1.37	1.28
15	1.144 0	1.13	1.56
22	0.963 0	0.95	1.85
29	0.823 0	0.81	2.16
36	0.708 5	0.70	2.48

注: $\eta_T$ 、 $\eta_{20}$  分别为温度  $T$  和  $20^{\circ}\text{C}$  时的黏滞阻力系数。

随着温度的升高,水的黏滞阻力系数呈现降低趋势,降低速率逐渐变小。因此,混凝土在不同温度水中扩散时受到的黏滞力也有区别。在原有模型的基础上改变地下水的温度,使水的黏滞阻力系数发生变化,设置 5 个不同地下水温度情况(8、15、22、29、 $36^{\circ}\text{C}$ )下水下混凝土灌注模型,通过分析沉井 1、9、5 剖面的水下封底层起伏特征,对不同地下水温度情况下的灌注混凝土平整度进行研究,模拟结果见图 15、16。

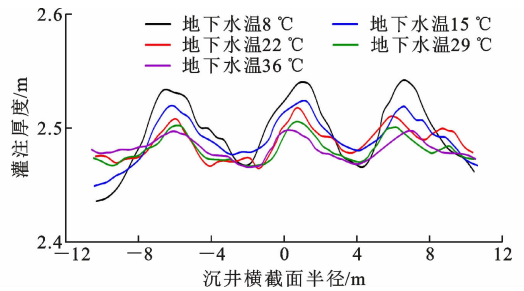


图 15 不同地下水温度时水下灌注混凝土厚度曲线

Fig. 15 Thickness curves of underwater perfusion concrete at different groundwater temperatures

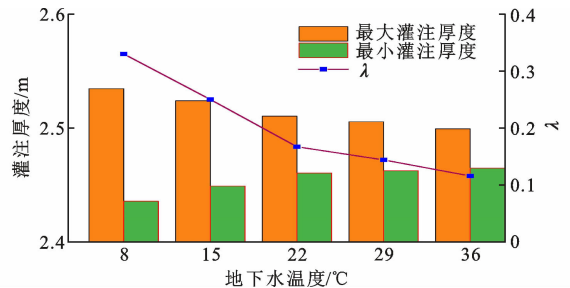


图 16 不同地下水温度时最大与最小灌注厚度及  $\lambda$

Fig. 16 Maximum and minimum perfusion thicknesses and  $\lambda$  at different groundwater temperatures

随着地下水水温的升高,水下混凝土中最大灌注厚度逐渐减小,最小灌注厚度逐渐增大, $\lambda$  逐渐减小,这表明地下水的温度越高,对水下灌注的平整度越有利。

在  $8^{\circ}\text{C}$  不利的温度下,混凝土灌注厚度的最大值与最小值差值仅为  $0.01 \text{ m}$ ,相较于地下水位高度和导管间距,地下水温度对于灌注混凝土整体平整度以及灌注厚度的影响较小。

## 5 结语

(1) 相对起伏度与导管间距呈正相关,随着导管间距减小,水下混凝土扩散半径内重合区域将增大, $\lambda$  也随之减小,但需要的导管也越多,工程中导管间距的确定需综合考虑封底质量与经济效益。

(2)  $\lambda$  与地下水位高度呈负相关,随着地下水位的增高, $\lambda$  与混凝土在水下流动性不断衰减且衰减速率加快,因此在高水位的工程中可在允许范围内适当降低水位高度,以满足封底层平整度要求,但在特殊情况下,如地下水位丰富、沉井底部存在越流补给等,不宜降低地下水位。

(3) 水温的改变对  $\lambda$  的影响总体较小,且随温度升高  $\lambda$  的变化速率逐渐减小,地下水温度对封底起伏度影响较小,且常年温度变化幅度不大,对施工安

全影响较小。

(4)由计算模型结果可知,对于昆山市森林公园地下筒仓式停车场的沉井封底,在不降低地下水位的条件下,选用五导管法、布置间距为4 m的方案时 $\lambda$ 低于0.1,平整度优,灌注厚度与平整度均满足工程要求,进一步验证了模型以及现场施工的合理性,可为今后类似的方案提供设计思路及风险研判参考。

## 参考文献:

## References:

- [1] 张振光,徐杰,汪盛,等.富水地层超深装配式竖井水下机械法掘进施工技术:以南京某沉井式停车设施建设项目为例[J].隧道建设(中英文),2022,42(3):492-500.  
ZHANG Zhenguang, XU Jie, WANG Sheng, et al. Underwater mechanical tunneling technology of an ultra-deep assembled shaft in water-rich stratum: a case study of sinking shaft underground parking garage in Nanjing, China [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(3): 492-500.
- [2] 姜弘,包鹤立,林咏梅.装配式竖井设计与施工技术应用研究:以南京某沉井式地下车库项目为例[J].隧道建设(中英文),2022,42(3):463-470.  
JIANG Hong, BAO Heli, LIN Yongmei. Research and application of design and construction technology of assembled shaft: a case study of a sinking shaft underground parking garage in Nanjing, China [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(3): 463-470.
- [3] LUO S. Research and application of anti-floating schemes of deep foundation pit of subway for underwater excavation and underwater concrete sealing[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 165: 04001.
- [4] 付小莲,徐芸,郁江特大桥深水基础钢围堰水下封底施工技术[J].世界桥梁,2014,42(3):30-33.  
FU Xiaolian, XU Yun. Construction technique of underwater bottom sealing for deepwater foundation steel cofferdam of Yujiang River bridge[J]. World Bridges, 2014, 42(3): 30-33.
- [5] 张广涛.超厚粉细砂地层大面积围堰水下封底施工技术[J].施工技术,2018,47(5):30-33.  
ZHANG Guangtao. Underwater subsealing construction technology of steel cofferdam with large area in super thick sand stratum[J]. Construction Technology, 2018, 47(5): 30-33.
- [6] 夏志强,张帆,周小华,等.钢吊箱水下封底施工关键问题总结[J].公路交通科技(应用技术版),2014(4):222-224.

XIA Zhiqiang, ZHANG Fan, ZHOU Xiaohua, et al. Summary of key issues in the construction of underwater bottom sealing for steel hanging box[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014(4): 222-224.

- [7] 朱浩,杨切.常泰长江大桥超大水下钢沉井终沉及封底关键技术[J].铁道建筑,2022,62(6):87-92.  
ZHU Hao, YANG Qie. Key technologies of final settlement and bottom sealing of super large underwater steel caisson of Changzhou-Taizhou Yangtze River bridge[J]. Railway Engineering, 2022, 62(6): 87-92.
- [8] 宋建禹.临江高承压水超深基坑支护方案研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(9):1529-1537.  
SONG Jianyu. Structural design scheme for super-deep foundation pit with high-pressure water adjacent to Minjiang River in Fujian[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(9): 1529-1537.
- [9] 帅玉兵,丘锦润,李鹏飞,等.盾构隧道内机械法施工竖井泵房封底试验与数值模拟研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(增1):128-135.  
SHUAI Yubing, QIU Jinrun, LI Pengfei, et al. Experimental study and numerical simulation of bottom sealing of shaft pump room in shield tunnel constructed by mechanical method[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1): 128-135.
- [10] 尚桌,葛忻声,王菁悦,等.深基坑水平封底在富水深厚砂层的加固效果[J].太原理工大学学报,2022,53(4):786-792.  
SHANG Zhuo, GE Xincheng, WANG Jingyue, et al. Reinforcement effect of horizontal bottom sealing of deep foundation pit in water-rich and deep sand layer[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53(4): 786-792.
- [11] 晏莉,杨海涛,崔云龙,等.富水粉砂地层深基坑底部注浆加固数值模拟分析[J].水利水电科技进展,2022,42(4):80-86,102.  
YAN Li, YANG Haitao, CUI Yunlong, et al. Numerical simulation analysis of grouting reinforcement at bottom of a deep foundation pit in water-rich silt stratum[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 80-86, 102.
- [12] 林呈祥,凌道盛,钟世英.颗粒流数值模拟在月壤岩土问题研究中的应用概况[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(9):1679-1691.  
LIN Chengxiang, LING Daosheng, ZHONG Shiyong. Application of particle flow code numerical simulation in research of geotechnical behavior of lunar

- soil[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(9): 1679-1691.
- [13] 周 健, 苏 燕, 池 永. 颗粒流模拟土的工程特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 390-396.  
ZHOU Jian, SU Yan, CHI Yong. Simulation of soil properties by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 390-396.
- [14] 彭岩岩, 刘宇航, 王天佐, 等. 数值模拟实验在岩土工程中的应用与展望[J]. 绍兴文理学院学报(自然科学), 2018, 38(8): 39-44.  
PENG Yanyan, LIU Yuhang, WANG Tianzuo, et al. Application and prospect of numerical simulation experiment in geotechnical engineering[J]. Journal of Shaoxing University (Natural Science), 2018, 38(8): 39-44.
- [15] CHEN Z, SONG D Q. Numerical investigation of the recent Chenhecun landslide (Gansu, China) using the discrete element method[J]. Natural Hazards, 2021, 105(1): 717-733.
- [16] 王泽华, 李 昺, 邢 磊, 等. 基于 PFC<sup>3D</sup> 的滑坡与建筑物相互作用过程研究[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(1): 107-118, 191.  
WANG Zehua, LI Bing, XING Lei, et al. Research on the interaction process between landslides and buildings based on PFC<sup>3D</sup> [J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(1): 107-118, 191.
- [17] ZHONG K Z, FAN J W, HUANG X M, et al. Discrete element simulation on anti-rutting performance of PAC-13 pavement in urban roads[J]. Materials and Structures, 2022, 55(4): 117.
- [18] 黄平明, 潘旭鹏, 牛艳伟, 等. 基于离散元的钢筋混凝土梁极限承载力研究[J]. 工程力学, 2022, 39(10): 215-226.  
HUANG Pingming, PAN Xupeng, NIU Yanwei, et al. Research on ultimate bearing capacity of reinforced concrete beam based on discrete element method[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(10): 215-226.