

软土场地航道近接开挖对既有桥梁桩基稳定性的影响

刘晓鹏¹, 苏学林¹, 旦 东¹, 朱 枫¹, 吴志坚², 王盛年²

(1. 中国安能集团第三工程局有限公司 重庆分公司, 重庆 401320;

2. 南京工业大学 交通运输工程学院, 南京 211816)

摘要:京杭大运河二通道整治工程近接穿越大量软土场地既有桥梁,工程开挖扰动不可避免会对桥梁桩基稳定性造成影响。以杭州市海宁段某既有桥梁下方航道近接开挖为例,采用饱和和非饱和理论开展软土场地航道近接既有桥梁工程施工过程数值模拟,探讨航道开挖、通航对桥梁桩基周边地下水水位及桩基稳定性的影响。结果表明:航道开挖将导致桥梁桩基周围土体孔压减小,且因受主动土压力影响,桩基将产生轻微沉降,并向开挖区偏移,最大变形出现在距离桩顶约3/8桩长处;通航后桥梁桩基周围土体孔压增大,其导致桥梁桩基上浮,并向非开挖侧偏移;总体上开挖扰动对桩基稳定性的影响远大于通航水位抬升的影响,航道近接开挖施工将造成既有桥梁桩基向航道偏移。研究成果可为软土场地航道近接开挖对既有桥梁桩基稳定性控制提供借鉴。

关键词:桥梁桩基;近接开挖;软土;地下水;桩基变形

中图分类号:F832.6;F752.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)19-0225-08

软土常见于沿海地带、内陆湖盆、洼地及河流两岸地带,在我国上海、天津、厦门等地区分布广泛^[1-3]。软土场地因天然含水量大,具有承载力低、压缩性高、沉降速度快等特点^[4]。近几十年,许多工程科研人员已就软土工程问题明确指出,软土具有显著应变软化现象,且经剪切大变形重新固结后,软土将出现峰值强度降低与残余强度增大现象^[5-7]。同时,受软土“蠕变效应”和“深度效应”影响,软土场地工程建设也极易发生扰动变形^[8],特别是近接施工,其不可避免地会对周围土体及邻近建筑物产生显著影响,不断给工程建设和防护带来新的科学问题和技术挑战^[9-13]。

就桥梁桩基而言,近接软土开挖势必对临近桥梁桩身、承台及桥墩产生影响。当位移增大到一定阈值时,其将直接影响交通运营安全性和舒适性^[14]。Michael^[15]对大量因深基坑开挖引起的地面运动和地表沉降进行数据分析后指出,软土地层开挖采用 Clough 图预测会导致变形位置判别不准;Poulos 和 Chen^[16-17]运用有限元和边界元耦合方法

研究了黏土层基坑开挖对邻近桩基的影响,发现土体开挖时临近建筑物的桩基础将受到开挖引起土体位移的作用,导致桩身产生附加应力、弯矩和侧向位移;皇甫明等^[18]利用模型桩试验和数值模拟计算,分析了水平荷载对竖向承载桩桩顶沉降变形与竖向荷载对横向承载桩桩顶水平位移和桩身弯矩的影响,发现竖向荷载对水平承载桩影响较小,水平荷载对竖向承载桩的影响较大。这些研究可为桩基施工扰动研究提供有利借鉴。然而,当前更需要引起重视的是,随着大跨度桥梁和超高层建筑的不断建设,如苏通大桥采用长约 100 m、直径 2.5 m 的钻孔灌注桩群桩基础,京沪高铁在深厚软土段的蕴藻浜特大桥群桩桩长 73 m、直径 1.2 m,上海的港汇大厦和世贸商城三期都采用了直径 8.5 m,入土深度分别为 85、74 m 的钻孔灌注桩,浙江温州瑞安皇都大厦采用了直径 10 m、桩长 98 m 的钻孔灌注桩,杭州钱塘江六桥采用的钻孔灌注桩桩长达 130 m,直径达到 2.3 m,这些已建工程在未来势将不可避免地受到新建工程施工开挖的影响。特别

收稿日期:2023-05-06

基金项目:国家自然科学基金地震联合基金(U1939209);江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022605);国家自然科学基金青年基金(41902282)。

作者简介:刘晓鹏(1982—),男,重庆人,中国安能集团第三工程局有限公司重庆分公司,高级工程师,工程硕士,研究方向为工程施工组织与安全管理;苏学林(1987—),男,云南元谋人,中国安能集团第三工程局有限公司重庆分公司,工程师,研究方向为工程管理与施工技术;旦东(1992—),男,重庆人,中国安能集团第三工程局有限公司重庆分公司,助理工程师,研究方向为施工技术;朱枫(1988—),男,吉林伊通人,中国安能集团第三工程局有限公司重庆分公司,工程师,研究方向为新材料;吴志坚(1974—),男,安徽太湖人,南京工业大学交通运输工程学院,教授,工学博士,研究方向为交通基础设施稳定性评价与预测;王盛年(1987—),男,甘肃武威人,南京工业大学交通运输工程学院,副教授,博士,研究方向为岩土力学与工程。

地,由于这些区域多为高含水率软土地层,工程施工必然扰动周围地层,引起地层沉降和变形,对临近既有桥梁桩基承载力产生影响,导致桥桩基础发生变形^[19],可能危及桥梁正常使用和结构安全,也会给新建工程施工造成严重影响。如何准确预测并控制土体开挖对邻近桩基变形的影响将是工程建设必须考虑的实际难题。

在前人研究基础上,以杭州市海宁段某既有桥梁下方航道近接开挖为例,采用饱和非饱和理论开展软土地地航道近接既有桥梁工程施工过程数值模拟,探讨航道开挖、通航对桥梁桩基周边地下水水位及桩基稳定性的影响。

1 工程概况

京杭运河二通道海宁段地处杭嘉湖冲湖积平原地区,是海宁融杭战略桥头堡,也是海宁西部的水上大动脉和沿河产业带,对今后海宁西部乃至全市经济生产都将产生重要影响。京杭运河二通道海宁段净宽 60 m,通航净高 7 m,最高通航水位 2.4 m。航道主线沿海宁与余杭边界由北向南依次穿越杭海城际铁路、沪杭高铁、沪杭高速公路和东西大道等铁路、高等级公路和城市主干道,全长 4.5 km,新建桥梁 7 座。该航段最大特点是陆地开挖航段,施工流程为先建造桥梁,再开挖航道。桥梁下部结构主墩采用墩接承台,下设钻孔灌注桩基础,桩径为 1.5、1.8 m 两种,桩长 70~80 m。工程护岸选用重力式护岸(含生态护岸)、桩基护岸等类型。该航段地层主要为冲湖相、海相、冲海相沉积层,第四系松散沉积层厚度 62~66 m。在如此深厚软土地层进行航道近接桥梁桩基施工(图 1),开挖扰动必将对上跨桥梁桩基稳定性带来重大影响。

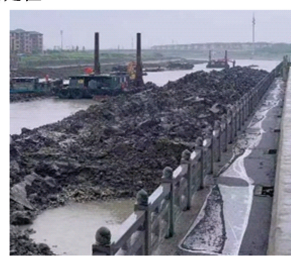
据新建大桥地质报告,该区域自然地面高程为 2.4~4.3 m,主要涉及以下工程地层:①填土(Q_{mc}^m)。灰褐色、紫红色、杂色,松散-稍密状,主要成分为碎石碎块、黏性土,表层 0.2 m 为路面混凝土。②粉质黏土($Q_{4^{al+1}}^{3al+1}$)。灰黄色、褐黄色,可塑-硬塑状,土质均匀,含铁锰质氧化物,局部夹少量粉土,干强度及韧性中等。③粉土($Q_{4^{al+m}}^{2al+m}$)。灰褐色,稍密状,很湿,土质均匀,摇震反应迅速。④淤泥质黏土($Q_{4^m}^{2m}$)。灰色,流塑状,土质均匀,含少量贝壳碎屑、有机质腐植物,干强度及韧性中等。⑤粉质黏土($Q_{4^m}^{2m}$)。灰色、灰褐色,流塑-软塑状,土质均匀,干强度及韧性高,切面光滑,含少量贝壳碎屑、腐植物。⑥黏土($Q_{4^m}^{1m}$)。青灰色,稍密-中密状,很湿,土质均匀,含少量黏粒,干强度及韧性中等,摇震反应迅速。



(a) 线路走位



(b) 挖泥船作业



(c) 疏浚土方开挖

图 1 现场施工

另外,该航段河道纵横,河道属于杭嘉湖平原河流水系,水网密布,河道比降小,水流平缓,水位变幅小。沿线与本工程关系较密切的地下水主要为第四系松散岩类孔隙潜水,分布在浅部,主要含水介质为冲海(湖)积的黏性土、粉土层,一般透水性较差,水位动态变化受季节、大气降水及河道水位控制,勘察期间实测地下水位埋深 0.9~1.5 m,年变化幅度为 0.5~1.0 m。

2 计算模型与参数

基于上述工程地质背景,采用有限元法开展软土地地航道近接既有桥梁工程施工过程模拟。

2.1 数值模型构建

根据勘察报告与施工方图纸资料,建立如图 2 所示模型。模型包括各地层以及上跨桥梁的承台、桩基和挡墙。为消除边界效应,模型长取 100 m,高 95 m。地层主要考虑填土、黏土、粉土、淤泥质黏土、粉砂和基岩。受 Geo-studio 软件局限性,为保证水能正常渗流,桩体采用结构单元模拟,并增加碎石、排水口等填方设计。航道侧地下水标高为 +2 m,对向侧地下水标高为 +3.5 m。

2.2 本构关系选择

数值模拟中,岩土材料采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构,模型数学表达式为

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (1)$$

式中: $d\epsilon_{ij}$ 为应变增量; $d\epsilon_{ij}^e$ 为弹性应变增量; $d\epsilon_{ij}^p$ 为

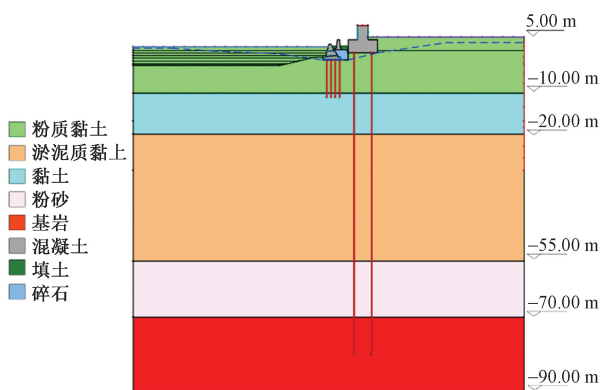


图2 航道开挖初始模型

塑性应变增量; i 和 j 为空间维度。

采用 Mohr-Coulomb 准则表征材料屈服特性。

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 \quad (2)$$

$$J_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \tau_{xy}^2 \quad (3)$$

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (4)$$

式中: J_2 、 J_3 、 I_1 为应力不变量; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为坐标中方向应力; τ_{xy} 为 xy 平面剪应力。

考虑到航道软土开挖、通航灌水过程将导致河岸土体出现饱和-非饱和排水和入渗。采用 Richards 模型描述非饱和渗透系数 K 与非饱和基质吸力 h 或含水率 θ 间关系, 表征航道软土饱和-非饱和渗流特征, 其数学表达式为

$$Q = -K(h) \nabla H \text{ 或 } Q = -K(\theta) \nabla H \quad (5)$$

式中: Q 为渗流速度; ∇H 为非饱和渗流场总水势梯度; $K(h)$ 和 $K(\theta)$ 为非饱和渗透系数, 分别是关于非饱和和土基质吸力 h 或含水率 θ 的函数。

对于非线性土体模型, 通常可采用 Newton-Raphson 迭代方法计算土中应力^[20-22], 即令

$$\varphi_i(\sigma) = J_i + Q_i^T(\sigma - \sigma^i) + \frac{1}{2}(\sigma - \sigma^i)^T H_i(\sigma - \sigma^i) \quad (6)$$

式中: i 为空间维度; H_i 为由 J 的二阶导数组成的矩阵, 其第 k 行第 l 列的元素为

$$H_{kl} = \frac{\partial^2 J}{\partial \sigma_{ik} \partial \sigma_{il}} \quad (7)$$

式中: i 、 k 、 l 为空间维度。 $\varphi_i(\sigma)$ 为在 $\sigma = \sigma^i$ 附近对 J 的二阶逼近, 令

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \sigma} = Q_i + H_i(\sigma - \sigma^i) = 0$$

则

$$\sigma^{i+1} = \sigma^i - H_i^{-1} Q_i.$$

2.3 计算参数取值

数值模型中各地层、混凝土物理力学参数见表 1。

表1 模型各土层主要力学参数

土层	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦/ 角($^\circ$)	弹性模量/ MPa	泊松比
粉质黏土	1 850	22.5	18.6	17.3	0.36
淤泥质黏土	1 730	12.8	9.2	7.3	0.48
黏土	1 920	23.2	16.8	20.6	0.30
粉砂	1 900	16	22.6	24.0	0.34
基岩	2 400	30	35	42.0	0.36
填土	1 900	31	12.6	20.0	0.35
碎石	2 350	—	—	5 000	0.26
混凝土	2 460	—	—	30 000	0.20

2.4 模型边界条件

采用固定位移约束模型边界, 即在模型底部设置 X 、 Y 固定边界, 在模型两侧设置 X 固定边界。考虑到地层中地下水渗流相对稳定, 在计算初始, 设置航道内土体地下水位为 +2 m, 航道外土体地下水位为 3.5 m; 在挡墙和承台等混凝土下方用结构单元构建桥梁桩基, 外边缘施加不透水边界条件(水流量为 0)。同时, 承台上部施加 -100 kN 竖向荷载。在进行工程开挖时, 移除航道内侧定水头边界。为探讨航道软土开挖、通航灌水对桥梁桩基周边地下水水位及桩基稳定性的影响, 分别在航道护岸前、护岸与承台间及承台后选取 3 个孔压监测面, 如图 3 所示, 每条截面选取 -1(1-1 截面)或 0(2-2、3-3 截面)、-5、-10、-15、-20 m 5 个监测点, 监测航道开挖桩周土体孔压变化; 同时, 在桩身上每 10 m 选取一个监测点监测桩体位移与变形。

2.5 计算工况设置

根据施工过程设计, 数值模拟分以下 3 步进行:

1) 未开挖阶段。如图 2 所示, 模型运行至地层水位达初始稳定状态。

2) 开挖阶段。在航道内侧进行均匀开挖, 7 d 后土层被挖至标高 -2.4 m, 中间设置长 8.8 m、坡比为 1:4 的斜坡。之后再运行 6 d, 使模型渗流处于稳定。因此, 二阶段总计 13 d。

3) 通航阶段。在第二阶段基础上, 向航道内灌水, 水位抬升方案如图 4 所示。河道水深 5 m, 按等分 7 次阶梯式(每天抬升水位 1 次并稳定 7 d)进行, 第三阶段总计 56 d。最终通航状态如图 5 所示。

3 结果分析与讨论

3.1 航道开挖对桩周土体水位及变形的影响

3.1.1 地下水位变化

航道内侧土体开挖过程及开挖后 13 d 内桩周

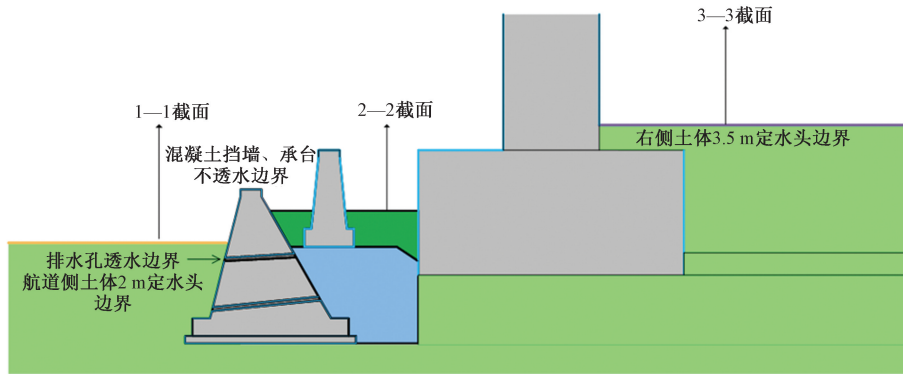


图3 模型边界条件施加及监测面选取

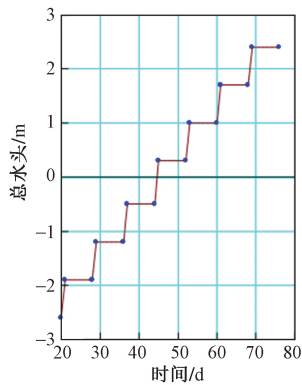


图4 通航水位边界条件设置

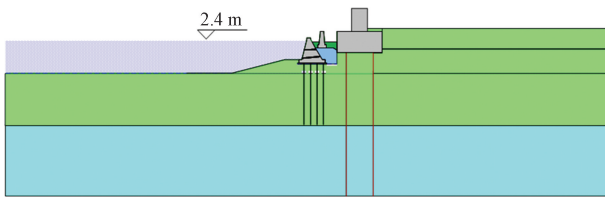


图5 开挖与通航水位模型

土体孔压变化(采用孔压改变间接表示地下水位变化)计算结果如图6所示。

由图6可知,总体上,航道开挖过程中航道内侧、混凝土挡墙后、航道外侧3个截面7 d内的水位变化规律基本一致,其均随时间发展呈不断下降趋势,但在航道开挖完成后混凝土挡墙后、航道外侧近地表地层孔压有所回升。这可能是由于桩基以下20 m内同一水平面上,航道外侧地下水位始终高于航道内侧,导致航道外侧土层地下水不断对航道内侧水位进行补给,从而产生航道外侧地下水向航道内渗流;当航道开挖完成后,航道内侧渗流逐渐趋于稳定,混凝土挡墙后、航道外侧土层地下水则因航道远处持续性补给滞后性导致水位出现回升,但这种抬升只是临时性的,随着时间发展,这一

抬升会再次回落,最终在航道内侧、混凝土挡墙后、航道外侧形成水力梯度相对一致的稳定渗流。对于较深处土层,在开挖完成2 d后,随着航道内侧地下水位逐渐趋于稳定,航道外侧土层地下水渗流也逐渐趋于稳定。这表明,航道开挖对近接桩基影响主要发生在开挖完成初期。因此,工程施工需重点关注这段时期的地层水位变化。

3.1.2 桩身位移分析

为分析航道开挖工程活动对桩基变形的影响,提取不同工期桩身不同位置监测点水平(X)方向(垂直于河道方向)位移量如图7(a)所示。由图7(a)可知,开挖施工进行2 d后,桩身开始随土层变形有向航道内侧偏移趋势,监测点水平(X)方向变形随深度先增大后减小;桩深80 m处监测点水平(X)方向变形则随时间发展变化不大,表明桩身底端已近乎不受航道开挖扰动影响;当开挖施工结束第2天后,桩身变形开始趋缓趋稳,桩身最大变形出现在约桩深30 m(3/8桩长)处,桩身最大水平位移约60 mm。图7(b)所示为航道内侧土体开挖过程及开挖后13 d内桩身监测点竖直(Y)方向(沉降)位移量变化。由图7(b)可知,桩身沉降变形受航道内侧土体开挖扰动影响相对较小,但近地表桩身变形明显大于深层变形,近地表10 m处桩身变形量约为6 mm,80 m深处桩身变形约为4.5 mm。另外,由于开挖过程中随着航道内土压力及水位降低,桩周土体对桩基负摩阻力同步减小,因此,航道土体开挖过程中桩基出现沉降;而在开挖完成后,由于水位逐渐稳定,桩基沉降因此逐渐趋缓。

3.2 航道通航对桩周土体水位及变形影响

3.2.1 地下水位变化

图8所示为航道通航灌水过程中航道内侧、混凝土挡墙后、航道外侧3个截面位置土层地下水位的变化。由图8可知,航道通航后,随着航道内水位

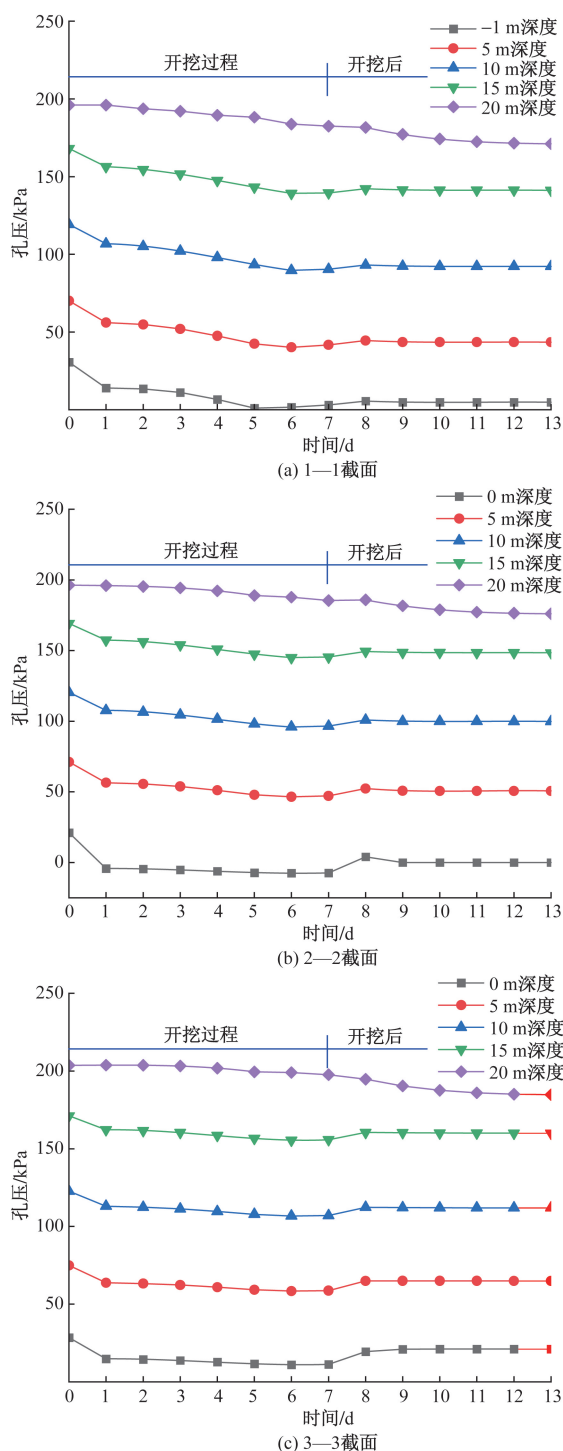


图6 3个截面航道开挖桩周土体孔压变化

(孔压)不断抬升,航道内侧、混凝土挡墙后、航道外侧地下水位随之不断抬升;相较航道外侧,航道内侧和混凝土挡墙后土层水位变化总体上受通航灌水影响较大,呈阶梯式发展,土层深度越浅,阶梯式特征越明显,且最终灌水完成后,土层孔压变化范围更大;航道外侧土层因相距航道有一定距离,受土层渗流作用,土层中地下水位抬升速率相对稳

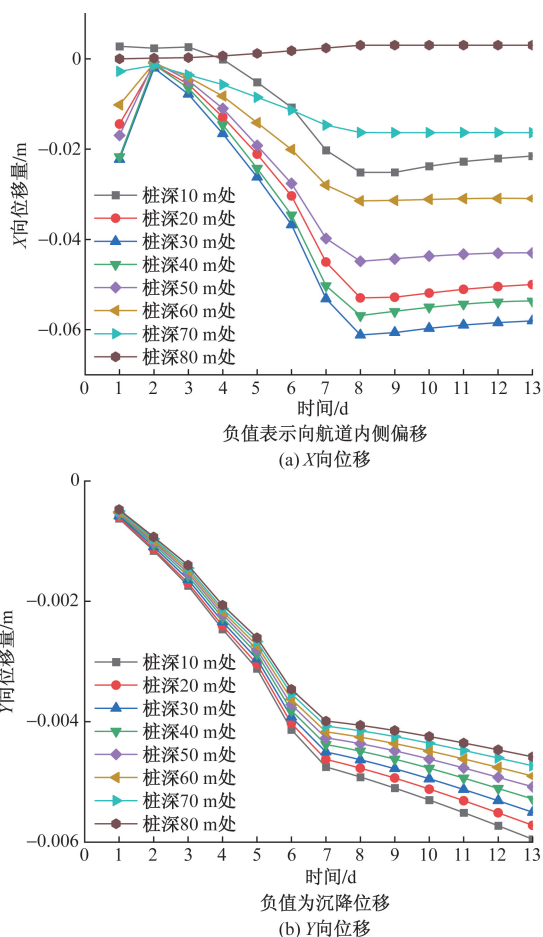


图7 航道开挖桩身X向、Y向位移

定,但土层中最终地下水高度略高于航道内侧和混凝土挡墙后土层。航道外侧深部土层孔压在灌水初期存在更为显著地先快速降低后缓慢增加变化,这可能是由于前期航道开挖导致航道外侧处于非饱和状态所致。

另外,承台和挡墙周边填土、碎石层的最终稳定水位将高于构筑物顶面,使得该区域土体将基本处于饱和状态。需要注意的是,尽管航道灌水会使地层水位回升,但最终却没有达到未开挖时标高,这表明通航注水并不能完全恢复因开挖排水对土体扰动的影响。

3.2.2 桩身位移分析

为分析通航灌水对桩身变形影响,提取桩身监测点水平(X)方向(垂直于河道方向)位移量,如图9(a)所示。由图9(a)可知,随着通航水位不断抬升,地下水位波动将导致近地表桩周土对桩体产生主动土压力,引起桩身向航道外侧小幅度偏移,但这种影响在航道水位到达一定高度以及航道内外侧土层渗压差降低后逐渐减弱并反转,最终因受桩周土向航道内侧变形使得桩身也向航道侧偏移。

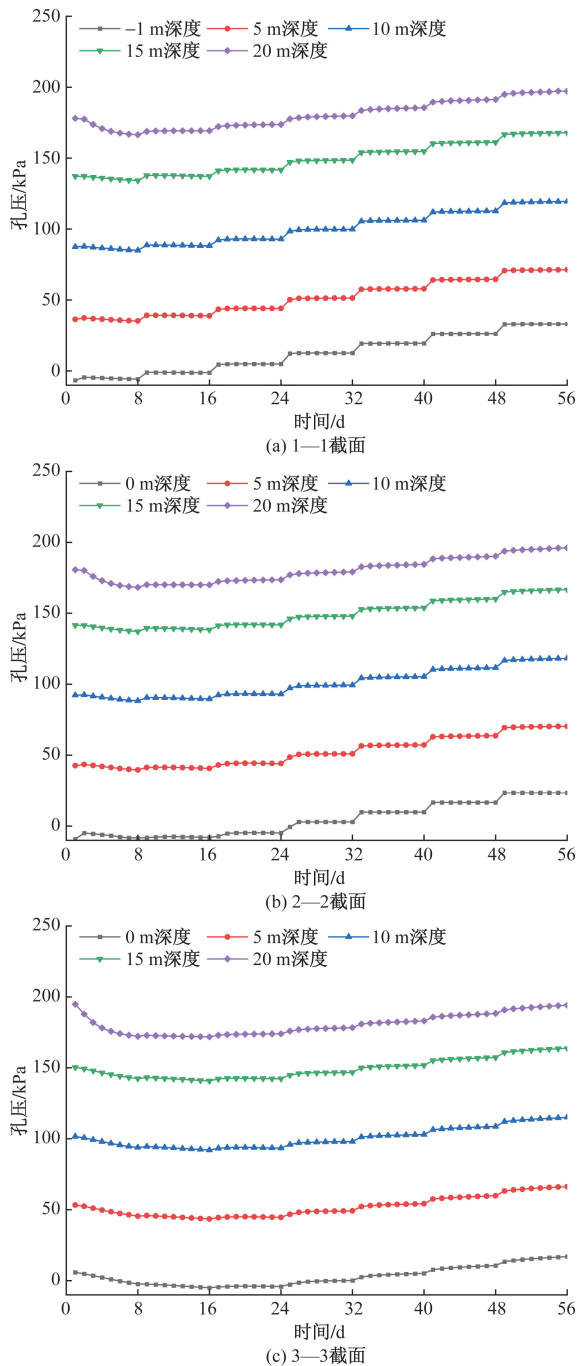


图8 3个截面航道通航桩周土体孔压变化

图9(b)所示为航道内侧航灌水过程中桩身监测点竖直(Y)方向(沉降)位移量变化。由图9(b)可知,相较于开挖时期,通航时期桩基沉降相对较缓,这是因为通航灌水过程中地下水位的抬升将对桩身产生浮托作用,抑制桩体下沉;与此同时,桩身含水量以及重度的增加以及桩身与桩周土间渗压差随时间的降低则又使得桩身因自重而下沉,最终在总趋势上依然以桩身沉降为主,并显著受航道开挖扰动影响。另外,航道开挖引起的承台向航道倾斜

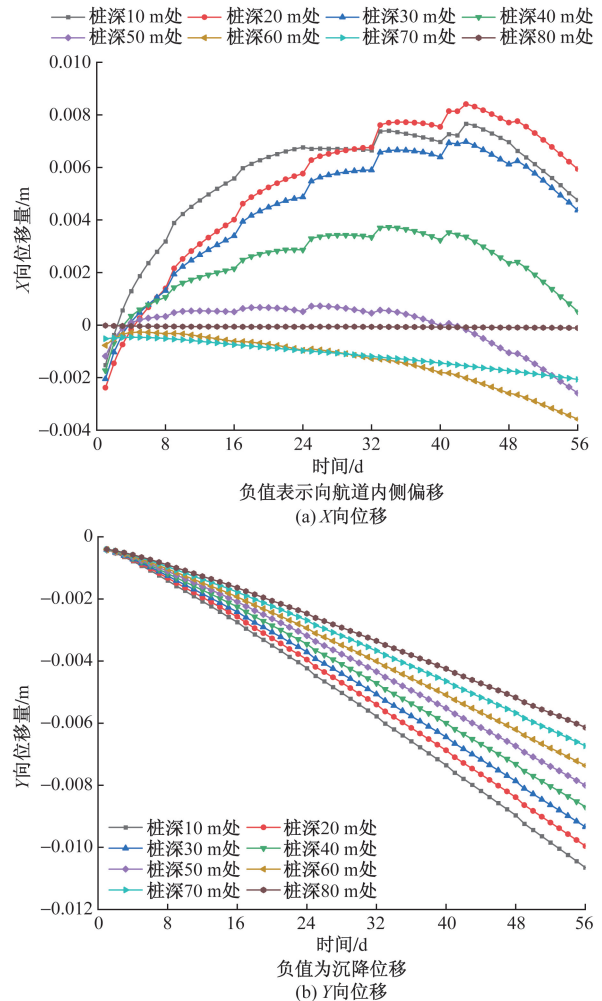


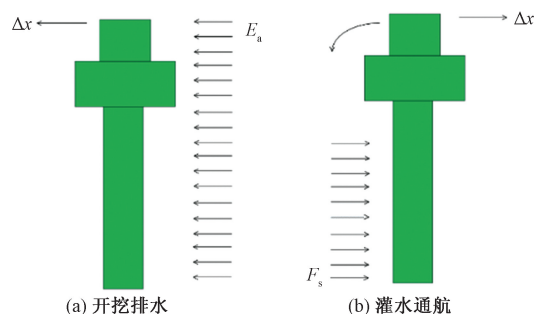
图9 航道通航桩身X向、Y向位移

变形同样在航道通航后有所遏制,桥梁承台有明显补偿式反向运动趋势,且在通航水位稳定后会达到新的平衡。这里同样需要注意的是,航道通航后的这种补偿式位移要远小于航道开挖造成的影响,且航道开挖至通航直至最后平衡还需很长一段时间后才能达到。

3.3 讨论

航道开挖和通航施工过程中,势必将引起航道内外侧土层出现较大孔压差。这种不平衡的孔压将促使航道外侧土层中的水向开挖航道排水或由航道内向航道外侧土层补给,最终达到动态平衡。本文中,航道开挖之后,开挖一侧地下水位降低,航道外侧土层中的水不断向开挖一侧渗流,导致桩基周围土体含水量降低,抗剪强度提升,但地下水对桩体浮托作用的快速消散,导致桩基沉降变形受自重作用贡献更为显著,因此,桩基出现下沉变形。与此同时,地下水渗流所引发的动水压力和软弱土体向开挖侧变形所产生的主动土压力则共同携带

桩身水平向变形[图 10(a)],既有桥梁桩基稳定性因此受开挖扰动影响显著。当航道灌水通航时[图 10(b)],航道内侧水位不断抬升,并向航道外侧土层进行补给,航道外侧土层地下水位随之不断抬升,地下水对桩体浮托作用不断变强,航道内侧土体孔压高于航道外侧,在侧向水压力和浮托力的共同作用下桩身向航道外侧形变,然而这种形变只是暂时的,随着侧向水压力消散,软弱土体向开挖侧变形所产生的主动土压力将再次其主控作用,最终致使桩身向航道开挖侧偏移,并可能存在倾覆风险,这规律类似于软土地区的基坑开挖工程,开挖后的影响与本文的结果大致相同^[23]。特别是在软黏土地区,由于土体的弹性模量比较小,更容易受到影响。



E_a 为航道水位压力; F_s 为地下水动水压力; Δx 为变形量

图 10 桩基结构受力示意图

另外,由计算结果可知,航道开挖和通航施工扰动对桥梁桩基带来的影响是几乎互斥的,且开挖过程对桩基周围土体带来影响大于通航时的影响。因此,在实际施工过程中,需对桩基两侧都要做好防护措施,以应对土体扰动带来的安全问题。例如,可设置支护桩应对桩基的沉降与上升,必要时采取排水与回填措施应对开挖与通航过程中两侧不平衡的侧向土压力引起的桩基不稳;或通航时尽可能水位缓慢抬升,以确保土体孔压不会发生大幅度波动。

此外,亦不难发现,尽管有限元软件具有使用方便、计算速度快等优点,但这种方法在某些方面有其局限性。例如,软件中土体参数是固定的,事实上这些参数受到工况的影响会产生变化和不确定性,同时,二维模拟结果也无法代表三维真实情况,特别地,对于混凝土桩基这种不透水单元,其会对二维渗流产生巨大影响。因此,发展更为全面的计算方法,对准确分析开挖类工程问题将更为有利。

4 结论

以海宁航道开挖施工项目为原型构建数值计算模型,利用饱和和非饱和理论研究航道开挖、通航对桩周场地地下水位及桩身变形的影响,得到以下主要结论:

1) 航道开挖对桩周土体扰动主要表现为开挖后开挖侧水位会迅速减小,然后缓慢回升至稳定;开挖后桩周土层地下水位降低,土体向开挖侧变形,使得桩身受到主动土压力作用,桩身负摩阻力降低则引发桩基沉降。

2) 航道通航后桩周土体孔压变化与开挖时相反,主要表现为阶梯式抬升至稳定;航道外侧土体由于土水压力作用会有背离开挖一侧趋势,但总趋势上依然以桩身沉降为主。

3) 通航灌水会在一定程度上弥补开挖时带来的影响,但是两者不能相互抵消。在经过开挖和通航整个施工阶段后,总体上桩基还是会沉降并向航道内侧位移。

4) 航道开挖与通航过程中均需对桥梁桩身做好加固与防护,通航后应尽可能保持水位稳定。

参考文献

- [1] 潘林有. 温州软土水泥土强度特性规律的室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 863-865.
- [2] 雷华阳, 贾亚芳, 李肖. 滨海软土非线性蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2806-2816.
- [3] 陈正汉, 李刚, 王权民, 等. 厦门典型地基土的地震反应分析与评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 66-77.
- [4] 陈书申, 陈晓平. 土力学与地基基础[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2015.
- [5] 陈波, 孙德安, 高游, 等. 弱胶结结构性软黏土力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2296-2303.
- [6] 陈建平, 袁杰, 叶辽羽, 等. 固结蠕变下软土微观结构参数的定量分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 4087-4094.
- [7] 王安辉, 章定文, 谢京臣. 软黏土中劲性复合桩水平承载特性 $p-y$ 曲线研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 381-389.
- [8] 程康, 徐日庆, 应宏伟, 等. 杭州软黏土地区某 30.2 m 深大基坑开挖性状实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 851-863.
- [9] 刘念武, 龚晓南, 俞峰, 等. 软土地区基坑开挖引起的浅基础建筑沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 325-329.
- [10] 经继, 刘松玉, 邵光辉. 软土地基上路堤沉降变形特征分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 728-730.
- [11] 王刚, 胡立强, 孙尚渠, 等. 淤泥质软土基坑搅拌桩与土钉复合支护结构受力与变形特性研究[J]. 科学技术与工

- 程,2022,22(12):4962-4969.
- [12] 刘波,范雪辉,王园园,等. 基坑开挖对临近既有地铁隧道的影响研究进展[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2):253-258.
- [13] 施建勇,赵维炳,顾吉,等. 考虑损伤的软土地基变形分析[J]. 岩土工程学报,1998,20(2):2-5.
- [14] BENG S S, MATSUMOTO T. Survival analysis on bridges for modeling bridge replacement and evaluating bridge performance[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*,2012,8(3):251-268.
- [15] MICHAEL L. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(3):203-224.
- [16] POULOS H G, CHEN LT. Pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement[J]. *Canadian Geotechnical Journal*,1996,6(33):670-677.
- [17] POULOS H G, CHEN LT. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,1997,2(23):94-99.
- [18] 皇甫明,王幼青,张军. 纵横向荷载作用下桩的工作性状研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(6):743-746.
- [19] 易念平,张信贵. 深基坑内基础工程桩对软土强度影响试验分析[J]. 岩土工程学报,2006(S1):1885-1888.
- [20] KELLN C, SHARMA J, HUGHES D. A finite element solution scheme for an elastic-viscoplastic soil model[J]. *Computers and Geotechnics*,2008,35(4):524-536.
- [21] KIRAN R, LI L, KHANDELWAL K. Performance of cubic convergent methods for implementing nonlinear constitutive models[J]. *Computers & Structures*,2015, 156:83-100.
- [22] HE J. A modified Newton-Raphson method[J]. *Communications in Numerical Methods in Engineering*,2004,20(10):801-805.
- [23] 鲁泰山,刘松玉,蔡国军,等. 软土地层基坑开挖扰动及土体再压缩变形研究[J]. 岩土力学,2021,42(2):565-573.

Influence of Adjacent Excavation on the Pile Foundation Stability of an Existing Bridge near Channel in Soft Soil Sites

LIU Xiaopeng¹, SU Xuelin¹, DAN Dong¹, ZHU Feng¹, WU Zhijian², WANG Shengnian²

(1. Chongqing Branch of China Anneng Group Third Engineering Bureau Co., Ltd., Chongqing 401320, China;

2. College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: The regulation project of the second channel of the Beijing to Hangzhou Grand Canal needs to cross many existing bridges closely in soft soil sites. The excavation disturbance of the project will inevitably significantly impact the stability of the pile foundation of the overpass bridge. Taking the channel excavation under an existing bridge in the Haining section of Hangzhou City as an example, numerical simulations on the construction process of the channel adjacent to an existing bridge project in soft soil sites were carried out based on saturated-unsaturated seepage theory. Channel excavation and navigation influences on the groundwater level and pile stability around the bridge pile foundation were analyzed and discussed. The results show that excavation of the channel would lead to a decrease in the water pressure of the soil around the bridge pile foundation. Due to the influence of active soil pressure, the pile foundation would experience a small settlement and shift towards the excavation area. The maximum deformation would occur at a distance of about 3/8 of the pile length from the top. The increase in soil water pressure around the bridge pile foundation after navigation would cause the bridge pile foundation to float upwards and shift toward the non-excavated side. The impact of excavation disturbance on the stability of pile foundations was overall more significant than that of navigation water level rise. The excavation near the waterway would cause the existing bridge pile foundations to shift toward the river. The research could provide a theoretical reference for ensuring the stability control of existing bridge pile foundations during the excavation of adjacent waterways in soft soil sites.

Keywords: bridge pile foundation; adjacent excavation; soft soil; groundwater; pile foundation deformation