

DOI: 10.11779/CJGE2014S2046

基坑降水对临近运营高铁桥墩的影响评估分析

孟长江, 熊大生, 赵海粟, 张燕, 于廷新

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 针对苏州虎丘婚纱城基坑降水对临近沪宁城际铁路的影响评估, 在达西定律和裘布依假设基础上, 提出一种考虑基坑落底式止水帷幕在不同程度失效情况下, 基坑降水引起运营高铁桥墩附近地下水位变化的计算思路, 并对基坑降水导致的运营高铁桥墩沉降和安全系数变化进行了影响分析, 结果表明: 在一定假设条件下, 基坑降水将导致桥梁桩基中性点和桥墩沉降变形呈非线性增长变化, 并降低了桥梁桩基安全系数, 高铁桥墩受地下水变化敏感。

关键词: 基坑降水; 落底式止水帷幕; 失效程度; 高铁桥墩; 沉降; 安全系数

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0265-04

作者简介: 孟长江(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察、设计、评估等方面工作。E-mail: tsymcj@163.com。

Assessment of effect of dewatering of excavations on nearby piers of operating high-speed railways

MENG Chang-jiang, XIONG Da-sheng, ZHAO Hai-su, ZHANG Yan, YU Ting-xin

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Ltd, Wuhan 430063, China)

Abstract: According to the evaluation of effect of dewatering of excavation of Huqiu Wedding Mall in Suzhou on nearby Shanghai-Nanjing Railway, on the basis of the Darcy's law and the Dupuit assumption, some computing ideas on changes of groundwater levels caused by dewatering of excavations near the piers of piers of operating high-speed railways, considering different degrees of failure cases of closed cut-off curtains in excavations. The pier settlement of operating high-speed railway and change of safety factor caused by the dewatering of excavations are analyzed. The results show that, under certain assumptions, the dewatering of excavations will cause the nonlinear increase of the neutral point of the bridge and pier settlement growth changing. The safety factor of the pile foundation is reduced, and the piers of high-speed rail ways are sensitive to change of groundwater.

Key words: dewatering of excavation; closed cut-off curtain; failure degrees; high-speed railway pier; settlement; safety factor

0 引言

在临近运营高铁侧进行基坑降水将会给对沉降变形要求非常严格高铁带来很大的安全隐患, 影响其安全运营。因此, 开展基坑降水对运营高铁的影响评估已成为当前迫切需要解决的问题。目前关于基坑降水对高铁的影响分析多处于建设期^[1]。

对于无止水帷幕或悬挂式止水帷幕的基坑降水引起的地面沉降计算, 有通过运用水力学和土力学基本理论, 推导出地表沉降计算公式的^[2], 也有采用有限元及有限差分法进行数值模拟的^[3]。对于落底式止水帷幕条件下的基坑降水影响, 目前考虑的较少。冯晓腊等^[4]提出了一种落底式止水帷幕条件下基坑涌漏量的计算方法, 介绍了如何判定落底式止水帷幕的止水效果, 为定量计算坑外地下水通过落底式止水帷幕向基坑内的涌漏量提供了参考。但在基坑漏水对周边环境的影响分析方面, 特别是对受外界环境变化特别敏

感的运营高铁影响分析, 目前尚未有相关研究。本文提出了一种考虑落底式止水帷幕在不同失效情况下, 基坑降水引起运营高铁桥墩附近地下水位发生变化的计算思路, 并对基坑降水导致的运营高铁桥墩沉降和安全系数变化进行了影响分析。

1 工程概况

1.1 基坑工程概况

苏州虎丘婚纱城基坑最大开挖深度 10.2 m, 总面积 $10.0 \times 10^4 \text{ m}^2$, 基坑呈西北—东南走向, 长条形, 最长处约 920 m, 最宽处约 115 m, 基坑南侧长边与正在运营的沪宁城际铁路几乎平行, 最近距离仅为 36.7 m。

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划项目 (2014G008-D)

收稿日期: 2014-07-28

(1) 工程地质与水文地质概况

基坑所在场地自然地面以下 50.3 m 的土层属第四纪湖沼相、河口—滨海相沉积物，主要有黏性土、粉土和砂土组成，场地土的部分参数列于表 1。场地对本工程有影响的地下水有潜水、微承压水。潜水稳定水位埋深 0.20~2.50 m。场地内浅部微承压水主要赋存于④-1 粉土夹粉砂、④-2 粉砂夹粉土层中，主要接受侧向径流补给及越流补给，测得稳定水头标高为 0.30~0.65 m。

表 1 场地土的工程地质参数

Table 1 Geological parameters of soils

| 土层 | 重度 (kN·m ⁻³) | 固结快剪 | | 渗透系数推 荐值 k/(cm·s ⁻¹) |
|--------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|--|
| | | c _{eq} /kPa | φ _{eq} /(°) | |
| ①人工填土 | 18.6 | 10.0 | 8.0 | — |
| ②-1 粉质黏土 | 19.2 | 25.6 | 11.5 | — |
| ②-2 黏土 | 19.4 | 43.5 | 11.1 | 7.70×10 ⁻⁸ |
| ③粉质黏土夹 粉土 | 18.8 | 29.6 | 14.7 | 6.80×10 ⁻⁴ |
| ④-1 粉土夹粉砂 | 18.7 | 7.1 | 25.9 | 2.52×10 ⁻³ |
| ④-2 粉砂夹粉土 | 19.1 | 4.7 | 32.6 | 2.52×10 ⁻³ |
| ⑤粉质黏土 | 18.8 | 24.8 | 12.8 | 6.90×10 ⁻⁶ |

(2) 基坑围护与止、降水措施

基坑初步设计采用Φ900@1100 钻孔灌注桩+钢筋混凝土内支撑支护，止水帷幕采用单排Φ850@600 三轴水泥土搅拌桩，三轴水泥土搅拌桩止水帷幕穿过④-1 和④-2 层微承压水含水层，进入⑤层相对不透水层。降水采取坑内管井疏干。

1.2 临近沪宁城际铁路概况

沪宁城际铁路与本基坑平行区间以苏州西特大桥通过，设计时速 350 km/h，线间距 5 m，铺设无砟轨道。苏州西特大桥在此处均采用矩形桥墩，全桥墩台基础采用钻孔摩擦桩基础，桩径 1 m，平均桩长 37.5 m。桥墩基础矩形承台，尺寸为 6.3 m×8.6 m，厚 2 m，承台为 8 根桩，桩均进入第四系上更新统粉土层。

1.3 无砟轨道沉降要求及与本工程关系

桥梁墩台基础工后沉降限值主要是为满足高速铁路运营安全与舒适要求。根据《高速铁路设计规范》(TB 10621—2009) 中规定，无砟轨道桥梁墩台基础墩台均匀沉降限值 20 mm，相邻墩台沉降差为 5 mm。

此处所提及的沉降限值和沉降差均为无砟轨道建成后自身的荷载所产生的变形允许值，并不是对使用期限内某个外来因素产生的附加变形，因此基坑开挖及降水造成的铁路桥墩附加沉降及沉降差与《高速铁路设计规范》(TB 10621—2009) 限定值无直接关系，只能由铁路工务部门根据调轨限值来综合确定。

2 基坑降水对高铁桥墩的影响分析

本基坑工程止水措施采取落底式止水帷幕，降水

采取坑内管井疏干，理论上，降水不会对临近高铁造成影响，但考虑到地层不稳定、施工质量偏差等不可控因素，且本次评估过程中，铁路部门要求基坑支护开挖与降水对高铁桥墩的影响限值仅 2 mm，如果超过此限值，将会影响无砟轨道扣件调整能力和线路竖曲线圆顺的要求。因此，有必要考虑在止水帷幕不同程度失效情况下，基坑降水对临近沪宁城际铁路的不利影响。

以下分析建立在达西渗流定律和裘布依假定基础上开展，且未考虑自然界的水位降幅影响问题。

2.1 基坑降水对高铁桥墩处水位的影响分析

基坑止水帷幕在不同程度失效情况下，如图 1 所示可在基坑止水帷幕外侧设置水位观测井 1，在沪宁城际铁路桥墩附近设置水位观测井 2，两者可通过承压完整井的地下水降深计算公式求得之间的关系，建立联动，当沪宁城际铁路桥墩处水位发生变化时可在止水帷幕外侧观测得到，及时获取止水帷幕的失效情况，及时处理，避免发生帷幕大量漏水情况。

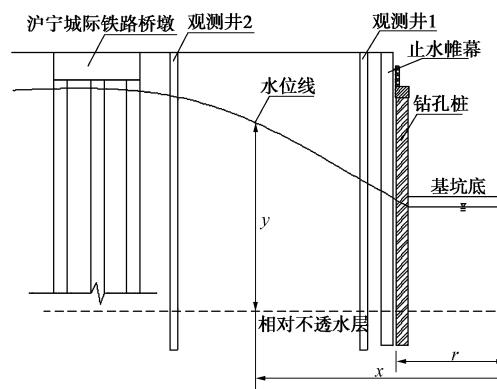


图 1 基坑止水帷幕外侧水位变化示意图

Fig. 1 Change of water level outside cut-off curtain of excavation

将基坑视作一个半径为 r 的大口井，运用裘布依稳定完整承压井流的计算公式，可获得双观测井水位计算公式^[5]：

$$y_i = y_w + \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{x_i}{r_w} , \quad (1)$$

式中， y_i ， y_w 分别为基坑中部和距离基坑中心 x_i 处的水位， Q 为基坑涌水量， T 为导水系数， r_w 为基坑等效半径。

$$y_2 - y_1 = 0.366 \frac{Q \lg \frac{x_1}{x_2}}{T} , \quad (2)$$

式中， y_1 ， y_2 分别为距离基坑中心 x_1 ， x_2 的两个观测井的水位。

此处假定本基坑止水帷幕不同程度失效，即止水帷幕外侧水位观测井 1 中的水头发生了不同程度下降，通过以上分析思路可知高铁桥墩附近的水位观测

井 2 亦将通过联动假定产生下降。按式(1)和(2)计算可知两观测井的水位下降关系见图 2。由图 2 可知, 基坑止水帷幕不同程度失效情况下, 基坑外侧水位变化与桥墩附近水位变化基本呈线性变化。

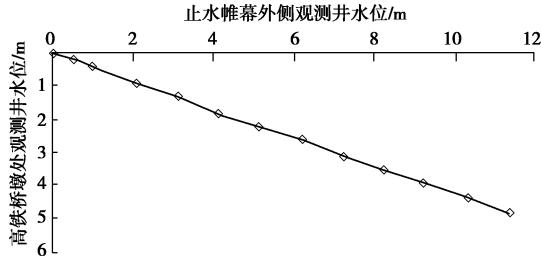


图 2 基坑止水帷幕外侧两观测井水位变化关系图

Fig. 2 Change of water levels at two observation wells outside cut-off curtain of excavation

2.2 桥墩处水位变化对桥墩沉降的影响分析

当止水帷幕失效或部分失效时, 由于基坑内管井降水, 致使桥墩处水位下降, 引起土体固结沉降, 在桥墩桩基上产生负摩擦, 最终导致桩基沉降。降水后桩周土体沉降不会立即完成, 需要固结过程, 即负摩擦不会立即全部施加在桩基上。为安全起见, 当帷幕失效导致坑外降水时, 土层固结度按 100% 考虑。

桩基负摩阻力取决于中性点的确定, 中性点 l_n 按桩周土层沉降与桩沉降相等的条件迭代计算。

(1) 降水引起的桩周土体沉降计算

基坑降水抽取微承压水, 由于微承压水顶、底板为粉质黏土、黏土渗透系数与粉砂层差别大, 可视为完全隔水, 因此主要压缩层为承压含水层粉砂层, 计算可参照下式完成:

$$s_{\pm} = \varphi \sum_{i=1}^n \bar{U}_i \frac{\Delta \sigma'_{zi} \Delta h_i}{E_{si}} \quad (3)$$

(2) 桩周土沉降引起的负摩擦及桩端沉降的确定
先假定计算桩基负摩阻力

$$Q_g^n = \eta_n u \sum_{i=1}^n q_{si}^n l_i \quad (4)$$

按《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB10002.5—2005), 计算桩基沉降, 将桩基当做实体基础, 基底压力按扩散角 $\varphi/4$ 扩散平均分布。

桩底中心沉降:

$$s_{\text{桩}} = 4 \cdot m_s \cdot s' = 4 \cdot m_s \cdot p_0 \sum_{i=1}^n \bar{U} \frac{z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}}{E_{si}} \quad (5)$$

(3) 确定中性点, 计算桥墩最终沉降

对比降水引起的桩周土层沉降与桩基沉降, 初始条件下, 桩周土体的沉降值势必大于桩基沉降值, 此时, 找到与桩基沉降值相等的桩周土沉降点, 再次假定此点为 l_n , 迭代计算, 直至找到初始设定中性点值 l_n 大于反算中性点值 l'_n , 且差值小于 0.1 m 时, 终止

计算。此处计算时, 将考虑水位下降过程中, 不同透水性土层的沉降计算差异。

下面以桥墩处地下水位降深 2 m 为例说明整个计算过程:

算例: 当降深为 2 m 时, 假设中性点位于第③层粉质黏土层, $l_n=8$ m, 初始地下水位 1.3 m, 降深 2 m 后, 水位为 -0.7 m。第①层 2.3 m, $\xi_n=0.25$, $\sigma_1=11.74$ kPa, $q_{si}^n=2.94$ kPa; 第②层 2.5 m, $\xi_n=0.3$, $\sigma_2=34.35$ kPa, $q_{si}^n=10.3$ kPa; 第③层 10.1 m, $\xi_n=0.35$, $\sigma_3=59.62$ kPa, $q_{si}^n=12.41$ kPa, $\eta_n=1$, 故单桩下拉力 $Q_g^n=\eta_n u \sum_{i=1}^n q_{si}^n l_i=311.74$ kN。

桩基负摩阻力引起的墩台沉降: 桥梁沉降计算依据《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB10002.5—2005), 将桩基当做实体基础, 基底压力按 $\varphi/4$ 扩散分布, $\bar{\varphi}=(\varphi_1 l_1 + \varphi_2 l_2 + \varphi_3 l_3 + \varphi_4 l_4)/l_0$, 经计算等效基底长 13.89 m, 宽 11.6 m。

由负摩阻力引起的墩台的附加应力为 $p_0=311.74 \times 8 / 13.89 / 11.6 = 15.48$ kPa。桩端处有效自重应力为 $\sigma_c=417$ kPa, $\sigma_c+p_0=432$ kPa。

$$\text{中心沉降: } s_{\text{桩}} = 4 \cdot m_s \cdot s' = 4 \cdot m_s \cdot p_0 \sum_{i=1}^n \bar{U} \frac{z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}}{E_{si}}$$

9.35 mm。当降水 2 m 时, 根据上式计算桩周土体地面沉降为 19.96 mm。经反算土体沉降 9.35 mm 处, $\Delta h=8.5$ m, $l'_n=6.4$ m。

所以 6.4 m < l_n < 8 m, 重新设定 l_n ; 经反复验算 $l_n=7.5$ m, $s_{\text{桩}}=8.47$ mm。

同理依次推算其它水位降深确定的中性点和桥墩的沉降如图 3 所示。

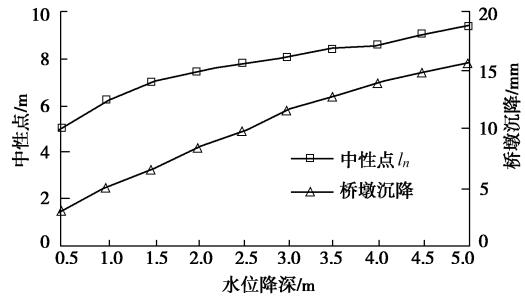


图 3 桥墩处水位降深与中性点、桥墩沉降关系图

Fig. 3 Relationship among water level drawdown, neutral point and settlement of pier

由以上计算结果可知, 在基坑止水帷幕不同失效情况下, 桥墩处水位下降 0.5~4.8 m, 对应的沉降量为 3.05~15.59 mm, 二者呈非线性增长关系。当帷幕完全失效时, 基坑中心降水为 11.3 m 时, 桥梁墩台处水位将下降 4.8 m, 导致的桥梁墩台中点沉降值为 15.59 mm。可见, 桥墩沉降对水位下降非常敏感, 按

照铁路部门对桥墩沉降要求,本基坑要保证 100% 的止水效果,因此建议临高铁侧基坑止水帷幕做成双排止水桩,加长止水桩桩长,并要求施工过程中加强检测和监测。

2.3 桥墩处水位变化对铁路桥梁桩基承载力的影响分析

当桥墩处地下水位下降时,由于桩周土体固结沉降,对桩将产生负摩擦,单桩极限承载力减小,在单桩最大竖向荷载不变的情况下,将导致安全系数降低。

根据《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB10002.5—2005),铁路桥梁钻孔灌注桩的单桩容许承载力:

$$[P] = \frac{1}{2} U \sum f_i l_i + m_0 A[\sigma] , \quad (6)$$

同时,单桩极限承载力:

$$P_u = 2[P] . \quad (7)$$

设 P_{MAX} 为单桩竖向荷载最大值, k 为安全系数:

$$k = P_u / P_{\text{MAX}} . \quad (8)$$

以沪宁城际铁路苏西特大桥第 71 号墩为例,进行安全系数验算。根据沪宁城际铁路苏西特大桥施工图中提供的设计资料可知,正常运营情况下单桩所受的最大荷载和容许承载力分别为 3253 kN 和 3443 kN,即 $k=2.1$ 。

当地下水降幅 0.5 m 时,中性点 $l_n=5.0$ m,依据《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008),存在负摩擦的摩擦桩承载力计算时,中性点以上的侧阻力为零。经计算 $P_u=6190$ kN, $k=1.9$ 。

同理,桥墩处地下水位在不同降深时,极限承载力和安全系数见表 2。

由表 2 可知,随着地下水水位的下降,中性点的位置随之下降,安全系数也不断降低;水位降幅自 0 m 增加至 4.8 m,安全系数将由 2.1 减小到 1.68。由此可见,高铁桥墩的安全系数受地下水位变化影响严重,应禁止在高铁桥墩附近抽取地下水。

表 2 地下水降幅与桥梁桩基安全系数的关系表

Table 2 Relationship between decrease of groundwater and safety factor of pile foundation

| 地下水降幅 /m | 中性点 l_n/m | 单桩极限承 载力 P_u/kN | 安全系数 k |
|-------------|----------------|----------------------|-------------|
| 0 | 0 | 6886 | 2.10 |
| 0.5 | 5.0 | 6190 | 1.90 |
| 1.0 | 6.2 | 5991 | 1.84 |
| 2.0 | 7.5 | 5777 | 1.78 |
| 3.0 | 8.1 | 5678 | 1.75 |
| 4.0 | 8.6 | 5595 | 1.72 |
| 4.8 | 9.4 | 5463 | 1.68 |

3 结 论

(1) 以苏州虎丘婚纱城基坑降水对沪宁城际铁路桥墩的影响评估分析为例,提出了一种落底式止水帷幕条件下基坑不同程度失效情况下,基坑水位下降对高铁桥墩的影响分析思路。

(2) 基坑止水帷幕不同程度失效将导致高铁桥墩处水位变化,经过对中性点的反复对比验算,可获得桥墩处水位下降将导致桥墩中性点和沉降变形呈非线性增长变化,可见桥墩沉降对水位下降非常敏感,为满足铁路部门对桥墩的沉降要求,提出了强化止水措施。

(3) 桥墩水位下降亦将导致铁路桥梁桩基承载力的下降,降低其安全系数,应严禁抽取高铁桥墩附近的地下水。

参 考 文 献:

- [1] 王连俊,朱孝天,张光宗.济南西客站房基坑降水对京沪高铁路基沉降影响分析[J].工程地质学报,2012, 20(3): 459 - 465. (WANG Lian-jun, ZHU Xiao-tian, ZHANG Guang-zong. Analysis of subgrade settlement of Beijing-Shanghai High-speed railway due to dewatering for foundation pit at Ji-nan railway station[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(3): 459 - 465. (in Chinese))
- [2] 陈明海.基坑开挖降水引起的地表沉降分析[D].杭州:浙江大学,2003. (CHEN Ming-hai. Analysis of settlement of ground surface induced by dewatering in excavation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese))
- [3] 张俊霞,李莉,张宝森.基坑降水的三维渗流计算分析[J].岩土工程界,2002, 5(5): 50 - 51. (ZHANG Jun-xia, LI li, ZHANG Bao-sen. 3D calculation and analysis of seepage induced by dewatering in excavation[J]. Geotechnical Engineering Field, 2002, 5(5): 50 - 51. (in Chinese))
- [4] 冯晓腊,李栋广.落底式止水帷幕条件下基坑涌漏量计算[J].水文地质工程地质,2013(5): 16 - 21. (FENG Xiao-la, LI Dong-guang. Chung leakage quantity calculation of foundation pit on the condition of the cut-off wall insert into impermeable layer[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013(5): 16 - 21. (in Chinese))
- [5] 陈崇希,林敏.地下水动力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999: 59 - 65. (CHEN Chong-xi, LIN Min. Groundwater dynamics[M]. Wuhan: Chinese Geology University Publishing House, 1999: 59 - 65. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)