

文章编号: 1000-7598 (2013) 10-2905-06

深基坑嵌岩地下连续墙隔渗效果 分析与评价方法研究

徐杨青¹, 刘国锋¹, 盛永清²

(1. 中煤科工集团武汉设计研究院, 武汉 430064; 2. 武汉地铁集团有限公司, 武汉 430030)

摘 要: 嵌岩地下连续墙上渗漏点位置、大小等的不确定性, 使数值模拟预报该状况下基坑内降水后地下水的流场十分困难。结合对武汉地铁 2 号线循礼门地铁站嵌岩地下连续墙的实际隔渗效果分析, 在数值模拟计算时提出了“纵向平移集中法”处置防渗墙渗漏点的方法; 采用该方法的三维数值计算结果与实测结果基本吻合, 证明该处置方法可用于模拟及预报存在渗漏的防渗墙内基坑降水的地下水流场变化过程, 为解决该工况下渗流场的模拟计算问题提供一种途径; 同时还分析、探讨了嵌岩地下连续墙的实际隔渗效果。该工程实例中的分析方法对同类工程具有借鉴作用。

关 键 词: 深基坑; 嵌岩地下连续墙; 渗漏; 纵向平移集中法; “悬挂式”防渗墙

中图分类号: TU 46+3

文献标识码: A

Analysis and evaluation of sealing effect of rock-socketed underground diaphragm in deep foundation pit

XU Yang-qing¹, LIU Guo-feng¹, SHENG Yong-qing²

(1. Wuhan Design and Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Wuhan 430064, China;

2. Wuhan Metro Group Co., Ltd., Wuhan 430030, China)

Abstract: When dewatering in deep foundation pit, the uncertainty of the leakage point location, size, and so on in the rock-socketed underground diaphragm in deep foundation pit cause the numerical simulation and prediction of the groundwater flow field very difficult to handle. Based on the analysis of the sealing effect of the rock-socketed underground diaphragm in Xunlimen station of Wuhan subway line No. 2, a method of longitudinal translation and put together is used to deal with the leak point in diaphragm while numerical simulation calculating. The results through 3D numerical simulation by this method are very close to the results obtained from actual measurement, it shows the possibility of using the method to deal with the problems of simulation and prediction of change process of the groundwater flow field in the case of dewatering in the rock-socketed underground diaphragm while it exists leakage point; it provides an approach to solve the problem. In the meantime, the actual sealing effect of the rock-socketed underground diaphragm is analyzed and discussed. The analytical procedure discussed for the project instance can be used for reference to the similar engineerings.

Key words: deep foundation pit; rock-socketed underground diaphragm; leak; method of longitudinal translation and put together; suspended diaphragm

1 引 言

地下连续墙接头部位局部的渗漏问题仍是世界性的技术难题。随着地下连续墙的加深, 对地下连续墙施工的垂直度的控制难度也会加大; 当地下连续墙嵌入到下伏基岩中时, 成槽的难度以及基岩起伏不平的变化还给地下连续墙的隔渗效果带来另

外的风险。

某些超深基坑地下水控制设计时, 由于担心基坑降水幅度较大将对基坑周边环境造成较大的影响, 特意将地下连续墙深度加大, 将其深入到下伏隔渗较好的基岩中, 形成嵌岩地下连续墙来对地下水进行控制。当地下连续墙局部存在渗漏时, 由于渗漏点的不确定性导致基坑降水渗流场的模拟十分

收稿日期: 2012-10-31

第一作者简介: 徐杨青, 男, 1965 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事深基坑工程、地基处理和边坡工程设计与研究工作。E-mail: xyq@zh-geo.com

困难。本文结合长江 I 级阶地上的武汉地铁 2 号线循礼门车站深基坑工程实例,通过“纵向平移集中法”处置嵌岩地下连续墙的渗漏点,近似模拟预测出了该工况下地下水水位的时空分布,在此基础上对存在渗漏的嵌岩地下连续墙的实际隔渗效果进行了分析与探讨。

2 工程概况

武汉地铁 2 号线循礼门地铁车站建设场地位于汉口闹市区,北侧为城市交通主干道,东侧为某单位办公楼,西侧为大型超市,南侧为繁华的商业街,轨道交通 1 号线从其南部上空跨过,基坑周边环境严峻。为消除或减小基坑降水对周边建(构)筑物的影响,场地地下水控制采用的是嵌岩地下连续墙与中深井点降水相结合的方法。

建设场地地势较平坦,地面高程为 23.1~25.5 m。车站长为 180 m,标准段宽为 20~30 m,顶板覆土厚为 3.0 m 左右,采用明挖法施工,基坑开挖深度在自然地面下约 21.0 m,局部挖深为 24.5 m。其基坑支护结构采用厚 800 mm、深 50 m 的地下连续墙加内支撑,地下连续墙进入下伏中风化岩层 2.0~3.0 m;基坑内降水设计有 16 口 50 t/h 的降水井,3 口备用井。

3 场地岩土工程条件

建设场地地貌单元为长江 I 级阶地前缘,地形平坦、开阔。场区表层为人工填土层,其下地层呈现典型的二元结构:上部为黏性土,局部夹淤泥质土,中、下部为粉砂、粉细砂、中粗砂,下伏基岩主要为泥岩和粉砂岩。场地地层分布详见图 1。

场地地下水有 3 种类型:上层滞水、承压水、基岩裂隙水。影响基坑开挖的主要是赋存于砂土层中的孔隙承压水,其与长江水具有水力联系。场地承压水稳定水位埋深为 2.7~4.5 m,丰水期水位标高为 18.0~20.0 m,年变幅为 3.0~4.0 m。施工时实测承压水位标高为 17.50 m。基坑开挖后坑底座落于(4-2)层粉细砂层中。

4 基坑降水方案设计及施工概况

4.1 基坑降水设计

该场地岩土工程勘察报告中的常规抽水试验得出的水文地质参数是:综合渗透系数 $K = 15 \text{ m/d}$,影响半径 $R = 180 \text{ m}$,承压水位标高为 19.5 m,含水层厚度约 35 m,当基坑四周无隔渗帷幕,采用“开放式”降水方案时,其基坑涌水量约为 46 000 t/d。

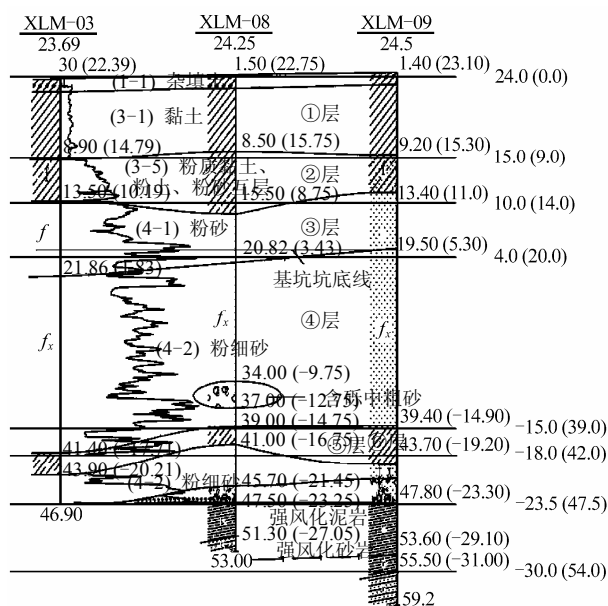


图 1 地铁车站地质结构纵剖面图

Fig.1 Geologic structure's longitudinal plan of subway station

基坑支护结构(地下连续墙)已植入到隔渗性能相对较好的中风化泥岩、砂岩中,形成“箱型”防渗构造。理想状况下,基坑开挖过程中仅需设置少量集水井将基坑内的地下水抽排至基坑外即可。

考虑到地下连续墙在施工过程中可能存在局部渗漏将导致基坑开挖及地下结构施工困难,对基坑的地下水控制还采取了中深井降水措施,其降水设计在现场抽水试验的基础上确定为 16 口井深 35 m 抽水量 50 t/h 的降水井,3 口备用降水井,同时在基坑外布置 7 口水位观测孔。其降水设计目标是使基坑内地下水水位低于基坑开挖面 1.0 m。设计的降水井、备用井、观测孔平面布置见图 2,图中 G1~G7 为观测孔,其他为降水井、备用降水井。在嵌岩地下连续墙内设计的基坑总抽水量约为“开放式”基坑降水涌水量的 50%。

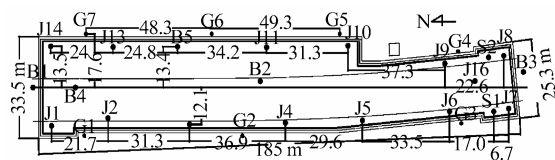


图 2 基坑降水井平面布置图

Fig.2 Layout of dewatering well in foundation pit

4.2 基坑降水试验过程

为初步查明嵌岩地下连续墙的实际隔渗效果,同时验明基坑内降水井的降水能力,在地下连续墙施工完毕基坑开挖前进行了 4 组群井抽水试验。试

验过程如下：2009 年 5 月 22 日~2009 年 5 月 26 日在基坑南侧进行了 3 组抽水试验；2009 年 8 月 6 日~2009 年 8 月 8 日在基坑北侧进行了 1 组群井抽水试验。

4.3 基坑降水运行概况

2009 年 8 月底，基坑开始进行分段分层开挖，随即开始逐步启动基坑内降水井。当基坑开挖到底时，必须 14 口降水井不间断抽水，其总抽水量约为 16 100 t/d，才能将基坑内的地下水水位降至设计的目标水位。基坑降水期间未对周边构筑物的使用造成不良影响，实测基坑周边地面最终沉降量为 7~10 mm。

5 隔渗效果分析与评价

经测算，地下连续墙的深度自地面起算达到 32 m 左右即可满足基坑支护结构本身的稳定性要求，而设计的地下连续墙深度之所以加深到 50 m，嵌入下伏相对不透水岩层中，其初衷就是截断基坑内外地下水的水力联系，使基坑内不必进行降水，从而避免基坑降水带来的周边环境的影响。

5.1 嵌岩地下连续墙的预期隔渗效果分析

在基坑四周隔渗帷幕伸入到基坑坑底下相对不透水层时，基坑内地下水水量应仅为基坑内含水层中储存的水量，此时基坑内的地下水水量可按下述经验公式^[1]计算：

$$Q = AS\mu \quad (1)$$

式中： Q 为基坑储水量； A 为基坑开挖面积； μ 为含水层的给水度； S 为基坑内含水层顶板或潜水面到基坑底部的高度。

按上式计算得出的基坑内的储水量约为 20 000 t。在理想的完全隔渗状况下，当基坑内降水井抽水时，基坑内水位应不断下降，基坑外水位应保持不变；同样，当基坑外抽水时，对基坑内的水位亦应没有影响。实际上，抽水试验及基坑降水运行期间的水位实测结果与该预想结果相差甚远。图 3 为基坑开挖及地下结构施工期间实测的 B1（北段坑外）、G7 和 G5（均为东侧坑外）水位降幅历时曲线图。

5.2 抽水试验结果分析

5.2.1 单井抽水试验

单井抽水试验位置位于基坑南侧（见图 2），共进行 2 组：第 1 组 J8（坑内抽水井， $q=53.1$ t/h）和 J16（坑内水位监测孔）；第 2 组为 B3（基坑外抽水井， $q=54.5$ t/h）和 J8、J16（坑内水位监测孔），两

组抽水水位稳定后的试验结果见表 1。

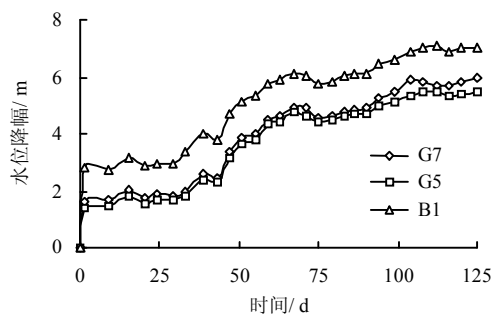


图 3 B1、G7、G5 实测水位降低历时曲线图
Fig.3 Measured drawdown duration curves of B1 G7& G5

表 1 J8、B3 抽水试验数据表
Table 1 Pumping test data of J8, B3

抽水井	观测孔号	初始水位埋深	水位降幅
		/ m	/ m
J8	J16	7.87	5.38
B3	J8	8.13	0.52
	J16	7.87	0.48

5.2.2 群井抽水试验

群井抽水试验在基坑南侧与北侧各进行 1 组。基坑南侧群井抽水试验抽水井为 J8（ $q=52.5$ t/h）、J16（ $q=53.6$ t/h），水位观测孔为 J6、J9、B3，实测水位稳定后的试验结果见表 2。

基坑北侧群井抽水试验抽水井为 J1、J2、J3、J14、B5（各井抽水量 $q=51.6\sim 53.5$ t/h），通过 B1、J13、B4、G7 进行水位观测。稳定后的试验结果见表 2。

表 2 基坑南、北侧群井抽水试验水位数据表
Table 2 Pumping test data of group wells in south and north foundation pit

基坑位置	观测孔号	初始水位埋深	水位降幅
		/ m	/ m
南侧	J6	8.18	9.94
	J9	8.13	9.92
	B3	8.23	1.08
北侧	B1	6.00	2.21
	B4	6.25	15.01
	J13	6.86	13.92
	G7	7.48	1.48

5.2.3 抽水试验数据分析

从表 1、2 中试验结果可以看出：与无隔渗帷幕时相比，无论是单井抽水还是群井抽水，基坑内的水位降幅均大幅度增加，而基坑外水位降幅则大

幅度减小; 防渗墙外降水井抽水时, 墙内的水位亦在下降, 但其下降幅度已大幅度减小。由此证明, 嵌岩地下连续墙具有较好的隔渗作用, 但仍未完全隔断基坑内外地下水的水力联系。经进一步对基坑南、北两端抽水试验数据分析, 可以得出如下认识:

(1) 虽然嵌岩地下连续墙具有较好的隔渗效果, 但亦存在明显渗漏, 其渗漏部位不能准确确定。

(2) 在嵌岩地下连续墙基坑降水时基坑内外水位降幅差显著加大。

(3) 基坑四周隔渗帷幕的渗漏量存在明显差异。

5.3 实际基坑降水效果分析及预警

描述地下水渗流运动的三维数值模型常用来模拟悬挂式地下连续墙内基坑降水的流场; 而实际上由于嵌岩地下连续墙的漏点位置、大小等的不确定性, 在三维数值模型中对该边界条件不能用确定的数学模型来描述, 使数值分析对该状况下渗流场的模拟预测“无从下手”。

5.3.1 基坑降水近似数值模拟

尽管该基坑地下水控制采取了嵌岩地下连续墙的隔渗结构, 实际基坑开挖过程中必须有 14 口降水井 (总抽水量约为 16 100 t/d) 不间断运行才能使基坑内的动水位保持在基坑开挖面以下 1.0 m, 说明基坑外地下水经防渗墙上的“漏点 (缝)”不断对基坑内地下水进行补给, 使基坑内的地下水水位达到动态平衡状态。其补给量与降水井的总抽排量相同, 但补给 (渗漏) 部位不明。

为近似模拟预报存在渗漏的防渗墙内基坑降水时的流场状况, 指导后续基坑降水运行, 数值模拟分析时采取将隔渗帷幕上不确定的渗漏点均纵向平移至地连墙墙趾处的方法, 使得原本杂乱无章分布的各渗漏点在墙趾处集中起来, 结果是各渗漏点在墙趾处将形成一渗透性与场地含水层渗透性接近或相同的虚拟的非隔渗窄带。本文将隔渗帷幕上渗漏点的这种处置方法定义为“纵向平移集中法”。防渗墙上的渗漏点经“纵向平移集中法”处置后, 便简化为“悬挂式”防渗墙。图 4 为“纵向平移集中法”对防渗墙上渗漏点的平移集中过程示意图。

据此推测, 存在渗漏的防渗墙其实际隔渗效果可能与某种长度的“悬挂式”防渗墙的隔渗效果相当。若对存在渗漏的防渗墙先经“纵向平移集中法”处置后, 再用数值法近似模拟分析得出的结果与实测的结果吻合或接近, 则证明该处置方法可使存在渗漏的防渗墙内基坑降水渗流场的模拟与预报, 从“无从下手”模拟分析上升到可近似模拟分析的高度。

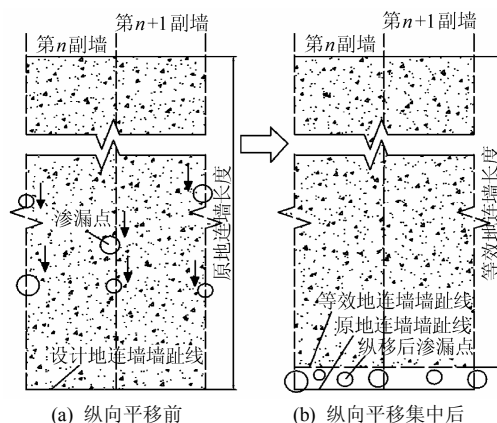


图 4 “纵向平移集中法”处置渗漏点示意图

Fig.4 Sketch of the method of longitudinal translation and put together used to deal with the leak point

5.3.1.1 基坑降水数值模型的建立与假设

根据达西定律与水均衡原理, 地下水在多孔介质中的渗流用下面的数学模型描述:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W &= \frac{E}{T} \frac{\partial h}{\partial t}, \\ (x, y, z) &\in \Omega \\ h(x, y, z, t)|_{t=0} &= h_0(x, y, z), \quad (x, y, z) \in \Omega \\ h(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} &= h_1(x, y, z, t), \quad (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ q(x, y, z, t)|_{\Gamma_2} &= q_1(x, y, z, t), \quad (x, y, z) \in \Gamma_2 \\ \frac{\partial h}{\partial n} + \alpha h &= \beta, \quad (x, y, z) \in \Gamma_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $E = \begin{cases} S, & \text{承压含水层} \\ S_y, & \text{潜水含水层} \end{cases}$; $T = \begin{cases} M, & \text{承压含水层} \\ B, & \text{潜水含水层} \end{cases}$;

$S_s = \frac{S}{M}$; S 为贮水系数; S_y 为给水度; M 为承压含水层单元体厚度, (m); B 为潜水含水层单元体地下水饱和厚度, (m); k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} 分别为各向异性主方向渗透系数, (m/d); h 为点 (x, y, z) 在 t 时刻的水头值, (m); W 为源汇项, (1/d); h_0 为计算域初始水头值, (m); h_1 为第 1 类边界的水头值, (m); q_1 、 α 、 β 为已知函数; S_s 为贮水率, (1/m); t 为时间, (d); Ω 为计算域; Γ_1 为第一类边界 (给定水头边界), Γ_2 为第二类边界 (给定流量边界), Γ_3 为第三类边界 (混合条件边界)。

上述数学模型的求解可采用数值法, 本文中后续数值模拟分析采用 Modflow 软件进行。数值模拟分析时, 根据场地工程地质、水文地质条件及基坑特征, 对拟模拟区域地层进行了适当概化。概化后的数值模型中有 7 个物理层 (见图 1)。模型中各含水层的参数取值见表 3。模拟区域经概化后为非均质但水平向各向同性、空间三维结构、非稳定的地

下水渗流系统。

表 3 各物理层水文地质参数表

Table 3 Hydrogeological parameters of physical strata

土层号	渗透系数		贮水率 S_s
	$K_h / (\text{m/d})$	$K_v / (\text{m/d})$	$/ (1/\text{m})$
①黏土	0.000 5	0.000 1	1.0×10^{-5}
②粉质黏土、粉砂	2.500 0	0.900 0	2.0×10^{-5}
③粉砂	13.500 0	7.100 0	1.1×10^{-4}
④粉细砂	16.500 0	8.900 0	1.3×10^{-4}
⑤粉质黏土	1.000 0	0.500 0	1.5×10^{-5}
⑥含砾中粗砂	25.000 0	15.000 0	3.0×10^{-4}
⑦风化泥岩砂岩	0.500 0	0.100 0	2.0×10^{-5}

注：(1) 表中数据系根据现场综合抽水试验结果、参照其他场地实测数据及经验给定。(2) ⑤层渗透系数考虑到其厚度、起伏变化较大及基坑内大致均匀分布有勘探孔、抗拔桩等可能已将该层局部上、下贯通而将其渗透性适当放大。

三维数值模拟时基坑降水井的位置、降水井结构及抽水量与实际状况一致；假定的“悬挂式”地下连续墙在模型中的平面布置与实际施工的位置一致。模型边界取在降水井影响边界以外，为定水头边界，模拟期间水位不变。数值模型模拟期为 30 d，模拟期间外部源汇项的强度保持不变。

5.3.1.2 基坑降水数值模拟

由上述建立的数值模型来计算，经“纵向平移集中法”处置后形成的“悬挂式”地下连续墙内，14 口降水井不间断运行时的地下水流场。通过对比同期基坑内外降水井 B1、B4、观测孔 G7 及其他水位观测孔的实测水位数据与模型计算的水位数据，当模型计算值与实测值吻合或接近时，可以认为该长度的“悬挂式”防渗墙对基坑降水的影响与实际存在渗漏的嵌岩地下连续墙对基坑降水的影响等效。经计算，当“悬挂式”防渗墙自地面起算深度约为 36.0~38.0 m 时，三维数值模型计算的基坑内外的水位与实测的基坑内外水位基本吻合。图 5 为由模型计算得出的 B1、B4、及观测孔 G7 水位历时曲线图。

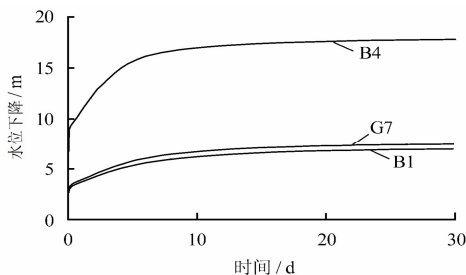


图 5 计算的 B1、B4、G7 水位历时曲线图
Fig.5 Calculated duration curves of water level of B1, B4, G7

表 4 为 14 口降水井运行 30 d 时 B1、B4、G7 中水位数据实测值与模型计算值对比表。

表 4 水位计算值与实测值对比表

Table 4 Comparison of water level data between measured and calculated

水位监测孔号	预测降幅 / m	实测降幅 / m
B1	6.97	6.85~7.06
B4	17.79	17.55~18.10
G7	7.48	5.68~5.93

三维数值模型计算的基坑内外水位变化过程与实测的基坑降水水位变化过程基本吻合，证明存在渗漏的防渗墙经“纵向平移集中法”处置后，场地地下水水位的时空分布的近似数值模拟基本可信，同时亦说明存在渗漏的 50 m 深度的嵌岩地下连续墙的隔渗效果与长度为 36 m 左右的“悬挂式”地下连续墙的隔渗效果相似。

抽水试验及数值模拟结果显示，在隔渗帷幕作用下基坑内降水时，基坑外水位降幅较开放式降水水位降幅减小程度较大，基坑降水引起的地面沉降将较大幅度降低。图 6 为代表性的监测点实测地面沉降历时曲线图，实测基坑周边地面沉降量普遍为 7~10 mm，该值大约为“开放式”降水预测的地面沉降量的 20%~30%。

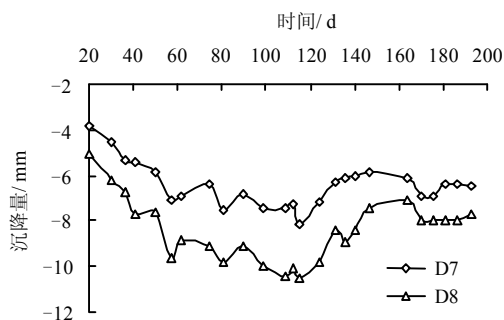


图 6 D7、D8 实测地面沉降历时曲线图
Fig.6 Measured surface subsidence duration curves of D7 & D8

5.3.2 基坑降水预警

分析 2009 年 8 月 6 日~2009 年 8 月 8 日基坑北侧群井抽水试验数据（见表 2）时发现观测孔中水位存在异常：基坑外 B1 孔中水位比 G7 孔内的水位降幅大 0.73 m，而依据 B1、G7 水位监测孔的平面位置（见图 2），按等效“悬挂式”地下连续墙数值模拟的本次群井抽水试验结果为：B1 水位降幅计算值应比 G7 水位降幅计算值小 0.5 m 左右（见图 7）。实测结果与模拟分析结果“背道而驰”。在

对群井抽水试验结果进行仔细分析后,得出的结论为 B1 水位监测孔附近地下连续墙的渗漏比 G7 处严重得多才能解释此异常现象。群井抽水试验后对此异常的解釋及时通报了相关施工单位,建议其在基坑开挖过程中密切关注 B1 附近的地下水渗漏,作好相应的安全防范准备。

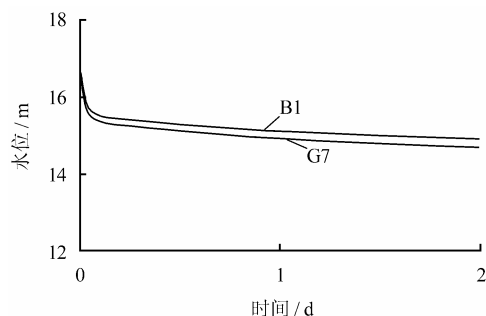


图 7 群井抽水时数值模拟的 B1、G7 水位历时曲线图
Fig7 Duration curves of water level of B1, G7 calculated by numerical model simulating pumping test of group wells

上述预警判断在基坑开挖后得到了验证。2009 年 9 月下旬,当基坑北端头开挖到自然地面以下 18.0 m 时发现 B1 附近的地连墙在此深度处存在一面积约为 0.1 m^2 的大洞,基坑外地下水经该洞大量涌入基坑内,验证了群井抽水试验后的分析、预判。施工单位在该险情出现前已得到预警,作好了相应的防范准备,发现该险情后迅速启动了应急预案,避免了工程事故的发生。

随后建设的武汉市轨道交通 2 号线上的相邻的江汉路地铁车站基坑工程,其基坑围护结构形式与之相同,基坑开挖前未获得有关帷幕渗漏的预报与预警,发生了因基坑开挖深度内地下连续墙出现孔洞而大量涌水,迅速造成基坑周边严重沉陷的工程

事故。因此,抽水试验及试验分析、总结不失为检验、预测嵌岩地下连续墙隔渗效果的一种直接有效的方法。

6 结论及建议

(1) 由于嵌岩地下连续墙的渗漏部位事先不可知、不确定,使该类型的基坑降水渗流场的模拟预测困难,采用文中提出的渗漏点“纵向平移集中法”近似地模拟预报场地地下水的时空分布,其计算结果与实测结果基本吻合,证明该处置方法在本工程中可行,其普遍适用性有待进一步验证。

(2) 虽然嵌岩地下连续墙局部存在有渗漏,但其对基坑降水效果的影响还是有十分明显的:使基坑内的涌水量大幅度减小;使基坑外地下水水位降幅大幅度减小;使基坑降水后基坑周边地面沉降量显著减小。

(3) 嵌岩地下连续墙理论上可截断基坑内外地下水的水力联系。当其存在渗漏时,其隔渗效果可能与某一深度的“悬挂式”地下连续墙的隔渗效果等同。

(4) 在嵌岩地下连续墙的渗漏部位事先不可知的情况下,该类工程基坑降水设计可在现场抽水试验的基础上进行。

(5) 现场多点抽水试验可检验、预测防渗墙的隔渗效果。建议类似基坑围护工程在基坑开挖前进行多点抽水试验,以便及时发现隐患,防止基坑工程事故的发生。

参考文献

- [1] 刘国彬,王卫东,基坑工程手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

水下挤密砂桩加固软土地基技术

尹海卿著,16开,平装,定价:20元,2013年06月出版,书号:ISBN 978-7-114-10598-2

本书以西部交通科研项目“离岸深水港建设关键技术研究”课题之七“水下挤密砂桩加固软土地基的技术研究”为依托,对水下挤密砂桩加固软土地基技术进行研究。书中系统地介绍了水下挤密砂桩复合地基加固机制与计算理论研究、水下挤密砂桩施工设备的研制与开发、水下挤密砂桩施工工艺及参数研究;结合水下挤密砂桩加固软土地基效果试验,分析了砂桩对提高软土地基承载力的作用,并验证了挤密砂桩复合地基的相关计算理论;同时,还对比阐述了水下挤密砂桩与其他加固方法的技术及经济上的优势。

读者对象:从事地基加固设计、施工和检测的工程技术人员及该领域的科研人员。

摘自 中华人民共和国交通运输部网站