



# 涌水深基坑稳定性分析及止水措施

牛文宣

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 针对涌水深基坑的稳定性和安全性问题, 采用有限元软件 ANSYS 对基坑的开挖过程进行计算, 得到不同开挖工况下基坑的状态和位移变形, 并与基坑实际监测数据进行对比, 分析涌水对基坑的影响程度, 评估基坑的安全性能。同时, 针对本工程基坑涌水的问题, 提出相应的解决方案和处理措施。通过分析可知, 基坑涌水对灌注桩的影响较小, 但对坑外土体和立柱等影响较大, 基坑整体的稳定性受涌水影响有限。虽发生了涌水现象, 但采取必要措施以后, 未对基坑的安全运行和后期开挖造成影响。

**关键词:** 基坑; 涌水; 有限元; 监测数据; 稳定性分析

中图分类号: TU 46<sup>+</sup>3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0071-07

## Stability analysis and sealing measures for deep foundation pit

NIU Wen-xuan

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of stability and safety of deep foundation pit after water and soil bursting, we adopt the finite element software ANSYS to analyze the excavation of foundation pit, and calculate the stress and deformation under different working conditions. Based on the comparison of calculation and monitoring data, we evaluate the safety of foundation pit, and put forward solutions. The results indicate that water bursting has little influence on the compresol pile of the foundation pit. However, the deformation of soil and girder change greatly. By the solution measures, the safety performance of foundation pit still is guaranteed.

**Keywords:** foundation pit; water and soil bursting; FEM; monitoring data; stability analysis

在基坑工程中, 地下水不仅直接作用于围护结构增加侧压力, 而且会改变土体的物理力学性质。对于深基坑而言, 由于内外的水位差很大, 渗流问题也更容易发生。由于挖土不当、任意改动设计方案和对地下复杂情况认识不足等因素, 均会造成止水帷幕失效, 在基坑开挖中会引起坑壁和坑底涌水、流砂现象, 造成坑内外土体流失, 破坏其稳定性, 影响相邻建筑物的安全性, 甚至会危及主体工程的使用<sup>[1]</sup>。孙玉永等<sup>[2]</sup>利用离心试验方法, 对基坑的破坏形式进行了分析。20世纪60年代, 有限元方法开始应用到基坑工程中,

文献[3-5]为基坑模型提出更好的单元划分方式, 采用有限元分析方法对基坑的支护结构和开挖过程进行计算, 了解基坑支护和周围土体的变形情况。随着计算机技术的发展, 利用有限元模型对基坑变形进行预测和分析变得更加方便<sup>[6-7]</sup>。

一旦发生涌水, 需及时判断涌水的影响程度, 以全面了解基坑的安全性。本文所研究的基坑在开挖至深度10 m左右时, 出现大规模涌水, 水体浑浊, 水量较大, 多个监测项目超过报警值, 为了很好地分析涌水对基坑稳定性的影响程度, 利

收稿日期: 2014-12-18

作者简介: 牛文宣(1987—), 男, 硕士, 从事深基坑监测与整体稳定性分析。

用有限元分析软件 ANSYS 计算基坑正常运行时各部件的形变和受力,并与基坑实际监测数据进行比较分析,充分了解涌水对基坑的影响程度。掌握基坑的整体稳定性,也为以后基坑开挖可能出现的同类型问题提供参考。

## 1 计算分析原理

在基坑开挖过程中,支护结构上的荷载主要有土压力、水压力、支撑预压力和邻近建筑物的侧向压力以及其它施工荷载等。计算地下水以下的水、土压力,有水土分算和水土合算两种方法,本文考虑到基坑土质中粉土含量较高,按水土压力分算原则进行<sup>[3]</sup>。水土压力分算法是用土的有效密度计算土压力,按静水压力计算水压力,再将二者相加即为总的侧压力:

$$p_a = \rho' g H K_a - 2c \sqrt{K_a} + \rho_w g H \quad (1)$$

$$p_p = \rho' g H K_p - 2c \sqrt{K_p} + \rho_w g H \quad (2)$$

式中:  $\rho'$  为土的有效密度;  $K_a$  为按土的总应力强度指标计算的主动土压力系数,  $K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$ ;  $K_p$  为按土的总应力强度指标计算的主动土压力系数,  $K_p = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$ ;  $\varphi$  为按固结不排水或不固结排水确定的内摩擦角;  $c$  为按固结不排水或不固结排水确定的内聚力。

## 2 地质条件和支护结构参数

本文以某公司深基坑开挖工程为依托,施工场地原为滨海滩涂地段,经人工吹填整平处理,地形平坦,地质情况复杂;根据前期地质勘察资料,将其适当简化后,将地层大体分为填土、粉质黏土、淤泥质黏土、粉土等 4 层。但对浅层粉质黏土层取较小的模量,以反映正应力水平对模量的影响<sup>[8]</sup>。基坑开挖范围内的土体的计算物理学参数指标如见表 1。

表 1 土层的计算物理学参数

土层	平均厚度 $H/m$	泊松比 $\mu$	弹性模量 $E/MPa$	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	粘聚力 $c/kPa$
填土	2.6	0.22	6.0	1 800	4.0	10.0
粉质黏土	3.4	0.35	5.0	1 850	12.0	18.0
淤泥质黏土	5.0	0.41	3.0	1 780	15.0	15.0
粉质黏土	5.5	0.35	8.6	2 110	13.5	18.3
粉土	13.0	0.20	15.0	1 980	30.0	10.0

基坑的尺寸为 58.7 m × 25.0 m,顶部高程为 6.5 m,最深处开挖至高程 -10.5 m,架设 4 道支撑。灌注桩长度为 25 m 进入持力层,结合工程经验,按等刚度转化原则将灌注桩排桩墙视为地下连续墙,宽度为 0.85 m。根据前期对桩的检测可知,混凝土强度等级为 C30,考虑到微裂纹影响和安全裕度要求,弹性模量取为标准值的 0.8,屈服后的模量取很小的值,等效屈服极限按其极限应变估计。最终确定弹性模量  $E = 2.4 MPa$ ,泊松比  $\gamma = 0.17$ ,密度  $\rho = 2 500 kg/m^3$ 。支撑体系及立柱的截面根据实际尺寸计算,支撑体系混凝土强度等级为 C35,弹性模量  $E = 3.15 MPa$ ,泊松比  $\gamma = 0.17$ 。

第 1 道支撑为钢筋混凝土支撑,等级为 C30,圈梁的尺寸为 1 400 mm × 800 mm,纵向钢筋混凝土

支撑尺寸 800 mm × 600 mm,角撑尺寸为 600 mm × 600 mm。第 2 ~ 4 道支撑均为钢支撑,三者的中心高程分别为 2.0、-2.5、-6.5 m。第 2 ~ 4 道钢支撑的尺寸相同,均采用钢管  $\phi 610 mm \times 10 mm$  做支撑,围檩采用钢结构双拼 H 700 mm × 300 mm,钢支撑间钢连杆采用钢管支撑  $\phi 410 mm \times 10 mm$ ,琵琶撑采用单根 H 700 mm × 300 mm。

## 3 模型与边界条件

本文主要采用水土分算的方法计算基坑的受力,为了保证分析计算的准确性,对开挖过程中基坑内外的水位变化情况进行统计,作为计算的边界条件。在利用 ANSYS 进行计算时忽略基坑涌水时的异常数据,将监测数据与计算数据进行对

比，分析涌水对基坑的影响程度，以全面了解基坑的安全性。

### 3.1 基坑水位统计情况

图1为基坑内外水位时程曲线。在土方开挖之前，基坑内部已经进行降水，保证合理的降水效率，以防止开挖时有积水，同时不会因为降水速率太快导致土体固结，增加开挖难度。开挖至深度8.3 m时，出现了大规模的降雨，坑内外水位差减小，坑内积水明显；开挖至深度10 m时，基坑北侧坑底出现大规模的涌水，基坑内部仅设置了3口降水井，井口直径500 mm。现有的降水设备难以满足开挖水位要求，增加临时抽排水设备，并将降水井数量增至5口。从后续开挖情况来看，排水工作基本保证了开挖过程中坑内无积水。在开挖后期，基坑外水位基本维持在-8.0 m左右，坑外水量基本稳定在8 000 m<sup>3</sup>左右，后期开挖中仅出现少量的渗水。

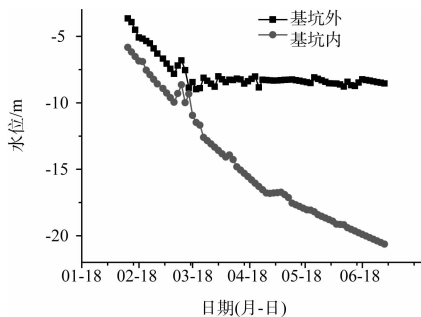


图1 基坑内外地下水水位时程曲线

### 3.2 模型和边界条件

本文采用弹性非线性模型对基坑土体进行模拟，土体选用平面四节点单元 PLANT42，桩体用 BEAM3 单元，支护结构用 LINK1 单元。根据文献[5]可知，当基坑开挖宽度大于深度时，开挖面后的边界取为深度的2~3倍，下边界在开挖底面下0.5h处，再扩大计算范围对基坑变形没有影响，最终确定模型高度为35 m、宽度为45 m。基坑有限元模型见图2。

在自重作用下，土体发生固结沉降达到稳定状态，在计算中应首先确定土体在自重作用下的应力和位移，作为后续计算的初始状态。施工阶段基坑附近有临时通道，根据施工经验和前期对

场地的勘察，取外部荷载为15 kN/m<sup>2</sup>。

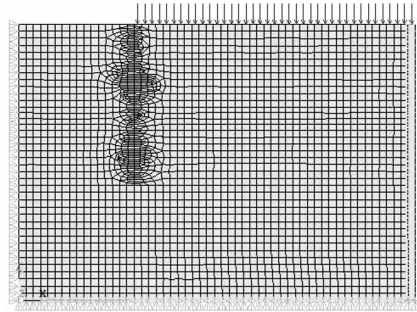


图2 基坑有限元模型

采用水土分算的方法计算土压力和水压力，忽略基坑涌水时的异常数据，利用对水位的统计结果作为水位差计算水压力荷载，在地下连续墙上施加三角形分布荷载的方法模拟水压力。计算分析时分为4个工况，见表2。

表2 基坑计算工况统计

工况	开挖至 高程/m	支撑安装情况	基坑外 水位/m	基坑内外 水位差/m
1	0.5	1道混凝土支撑	2.8	2.3
2	-4.0	1道混凝土支撑及1道钢支撑	-0.5	3.5
3	-8.0	1道混凝土支撑及2道钢支撑	-6.3	4.8
4	-10.5	1道混凝土支撑及3道钢支撑 安装底板	-8.4	9.4

## 4 计算结果分析

施工监测是信息化施工的重要组成部分，监测信息对合理安排施工工序、采取施工措施、反分析设计，提高设计水平有着重要作用<sup>[9]</sup>。涌水发生时，基坑开挖深度约10 m，土质较差，施工环境复杂未能进行渗流量监测。本工程的监测项目包括：围护墙变形监测、围檩沉降及位移监测、支撑轴力监测、立柱沉降监测及坑内外地下水水位监测。将基坑各监测项目进行统计并与有限元计算结果对比分析，以了解基坑涌水的影响水平。

### 4.1 围檩及立柱结果分析

#### 1) 监测结果。

图3为围檩和立柱的变形监测曲线。开挖至深度10 m左右，基坑出现大规模的涌水，此时围檩及立柱的沉降变化量均由下沉变为小幅上升，围檩上升幅度高于立柱。基坑东侧平均上升4.5 mm，

而基坑南侧平均上升 5.5 mm。结合位移监测数据可知,围檩北侧向坑外变形外,其他 3 侧均向坑内变形,并以南侧向坑内变位最大,达到了 15 mm,超过开挖深度的设计值。基坑内立柱平均上升 4.2 mm,低于围檩垂直变化量,但二者曲线形状大致相似。

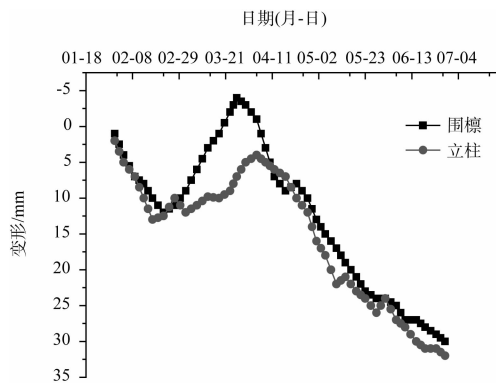


图3 围檩与立柱变形监测曲线

2) 计算结果与监测数据对比分析。

对围檩和立柱各工况变形的监测数据和计算结果见表 3。工况 1 中,计算结果与监测结果相差较小。开挖至工况 2 时基坑出现涌水,此时,立柱和围檩的监测数据和计算结果均为上升,这与淤泥质土层土质较弱有一定关系,并且围檩和立柱上升量监测值大于计算结果,说明涌水对围檩和立柱的影响要引起足够的重视,应采取必要措施防止影响进一步扩大。将工况 3 和工况 4 的监测数据与计算结果对比可知,此时围檩和立柱未再出现上升,监测数据和计算结果相差较小,在后期开挖中围檩和立柱基本稳定。

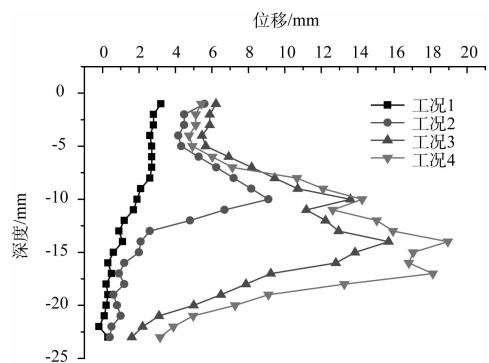
表3 围檩和立柱各工况累计沉降对比 mm

工况	围檩		立柱	
	监测	计算	监测	计算
1	12.0	10.5	12.5	11.0
2	-3.0	7.0	5.0	8.0
3	15.0	14.3	22.5	19.0
4	27.0	25.0	32.0	29.0

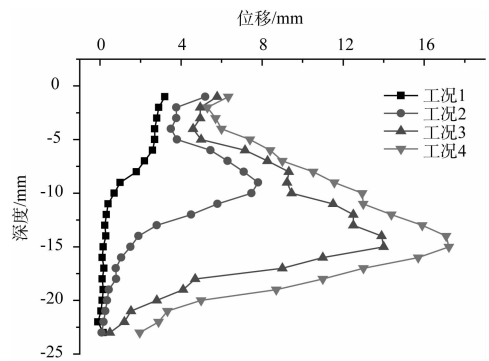
4.2 深层位移结果对比分析

1) 灌注桩深层位移结果分析。

不同工况下灌注桩深层水平位移监测数据与计算结果见图 4。由图 4 知,灌注桩的计算结果和监测结果的曲线形状基本相似,随着开挖深度的增加,水平位移累计值也不断增加,其中,工况 2 和工况 3 的位移增量高于其它工况。桩体水平位移的最大值出现的位置也有不同,工况 1~3 中最大位移值在开挖面附近,在进行工况 4 挖时,最大位移值基本稳定在深度 15.0 m 附近。



a) 监测结果



b) 计算结果

图4 灌注桩深层位移曲线

对土体和灌注桩深层水平位移最大累计值的监测结果和计算结果见表 4。开挖至深度 10 m 时,基坑出现大规模涌水,此时监测数据的最大累计位移为 8.7 mm,发生在深度 11.5 m 位置;计算结果的最大累计位移为 7.9 mm,发生在深度 10 m 位置,监测数据的最大累计值略高于计算结果,其最大位移的出现位置较深。综合分析工况 2 监测结果和计算结果可知,二者曲线形状基本相似,监测数值与计算结果的差值较小,说明涌水对灌注桩有一定影响,但影响有限。

表4 土体和灌注桩深层水平位移最大累计值 mm

工况	灌注桩		土体	
	监测	计算	监测	计算
1	3.1	3.5	4.9	4.8
2	8.7	7.9	17.0	10.1
3	15.7	14.2	21.6	18.1
4	18.7	17.4	27.0	21.4

## 2) 土体深层位移结果分析。

土体深层位移计算结果和监测数据曲线见图5。基坑进行工况2施工时，监测结果得到的累计位移最大值为17.0 mm，计算累计位移最大值为10.1 mm，监测数据出现明显突变，远大于计算结果，此时基坑出现大规模涌水，坑外土体出现塌陷。采取措施完成止水后，基坑继续开挖。完成工况3施工后，监测结果显示不同深度位移累计值平均增加了3.6 mm，计算得到的不同深度位移累计值平均增加了4.6 mm；完成工况4施工后，监测结果显示累计值平均增加了2.2 mm，计算得到的累计值平均增加了1.9 mm；工况3和工况4的监测结果与计算结果的累计值增量的相差较小。工况3和工况4监测曲线与计算曲线形状相似，后期监测未发现数据有突变现象，基坑涌水未对后期施工造成影响。

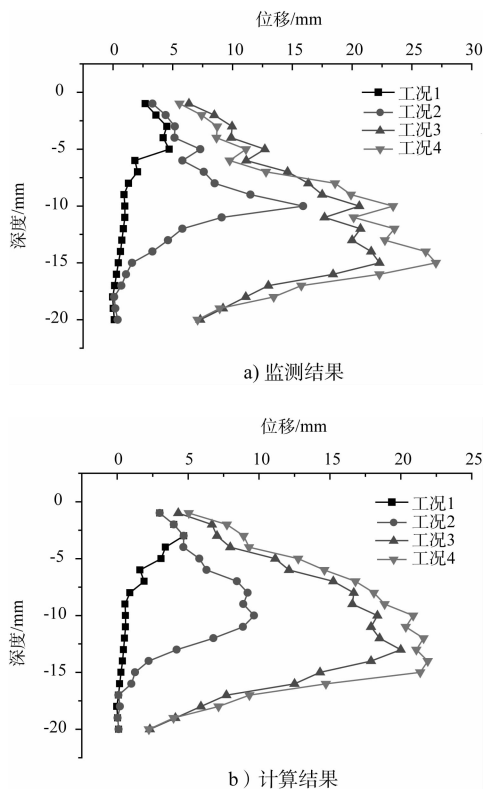


图5 土体深层位移计算结果与监测数据曲线

通过对监测资料和计算数据的对比，可以得到以下结论：

1) 对比灌注桩深层位移的监测曲线与计算曲线可知，监测数据曲线未发生突变，监测数据与计算结果相差较小，灌注桩受涌水影响较小。

2) 对比土体深层位移的监测曲线与计算曲线可知，受涌水影响，土体的监测数据有明显突变，并远高于计算结果，但考虑到工况3和工况4的监测数据与计算结果的对比，可知涌水对基坑的影响得到及时控制，未影响后期施工。

3) 灌注桩和土体的深层累计位移均随开挖深度的增加而增大，沿深度的分布具有中间大、两端小的梭子形特点。

## 4.3 支撑轴力监测与计算分析

## 1) 监测结果。

图6为第1~4道支撑轴力时程变化曲线，图中数值为负说明其轴力为压力。由图6可知，第1道支撑轴力在2月18—22日达到最大值2 006 kN，随后轴力减小，最终稳定在1 300 kN附近；基坑出现涌水时，第2道支撑轴力出现突变，最终达到最大值4 280 kN，远超过设计值，基坑涌水对支护结构影响较大，在采取止水措施和安装下一道支撑后，第2道支撑的轴力有所缓解，最终维持在2 700 kN左右。第3道钢支撑轴力在4月22日增加到4 070 kN，其轴力在安装下一道钢支撑之后有所缓解，最终维持在3 030 kN。第4道钢支撑在4月22日开始安装，轴力增幅远小于其它支撑，到5月22日轴力达到最大值4 200 kN，在完成基坑底板施工之后，轴力基本稳定在3 500 kN。底板施工完成后，第3、4道支撑部分监测点数据为正值，说明支撑此处存在拉力。各支撑轴力随着开挖深度而增大，随下一道支撑的安装得以缓解，并最终稳定。

## 2) 计算结果与监测数据对比分析。

表5为支撑轴力监测数据和计算结果的对比，随着基坑开挖深度的增加，支撑轴力逐渐增加，且埋设越深支撑轴力越大，但各道支撑轴力的增加幅度并不相同。对涌水发生时的工况2进行分析，

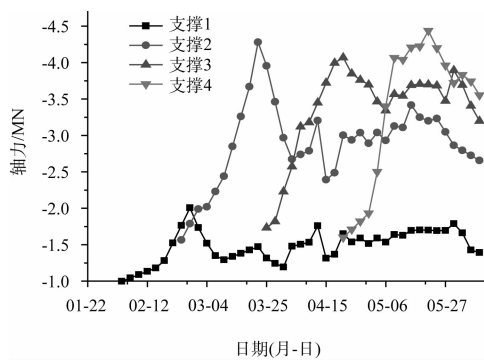


图6 第1~4道支撑轴力时程变化曲线

此时第2道支撑轴力远大于计算结果,统计第2道支撑所有轴力监测点数据,发现涌水位置附近

部分监测点轴力为正值,第2道支撑轴力分布不均,说明基坑涌水对钢支撑产生较大影响,必须采取紧急措施控制涌水,防止破坏进一步扩大。查阅施工日志,第5道支撑在安装之前,基坑暴露时间过长,导致第3道支撑轴力实测值高于设计值。分析表中数据,完成基坑底板施工后4道支撑的轴力监测结果分别是计算结果的1.12、1.30、1.14、1.11倍。表4中各支撑轴力监测值均大于计算值,埋设在各支撑中的应变计所测得的轴力并不完全由荷载产生,还有混凝土的干缩、湿胀、徐变以及构件受温度等变化产生的非荷载应力。

表5 轴力监测数据和计算结果对比

工况	第1道支撑轴力最大值/kN		第2道支撑轴力最大值/kN		第3道支撑轴力最大值/kN		第4道支撑轴力最大值/kN	
	监测结果	计算结果	监测结果	计算结果	监测结果	计算结果	监测结果	计算结果
1	-2 010	-1 748						
2	-1 734	-1 508	-4 280	-2 996				
3	-1 650	-1 435	-3 956	-3 087	-4 269	-3 744		
4	-1 788	-1 555	-3 415	-2 756	-3 893	-3 287	-4 438	-3 998

## 5 基坑止水措施

由于涌水仅发生在基坑北侧底部,及时采取有效的止水措施,可以降低涌水对基坑自身及周围环境的破坏,保证后期开挖顺利进行。在基坑发生涌水后,采取的止水措施主要有:

1) 基坑开挖暂停,封闭基坑周围的临时通道,禁止车辆通行。

2) 以涌水点为中心,堆放沙袋等进行反压封堵。浇筑混凝土,在继续增加反压重力的同时将土袋墙连为一个整体。

3) 在出水点附近支护桩外侧钻取2排注浆孔,采用双液灌浆进行封堵。钻孔深度12~16 m,导入一定量的水玻璃,随后用水泥浆进行压力灌浆,反复数次直至灌满为止。

4) 增加临时抽排水设备,基坑内部增设2口降水井,在基坑边缘位置增设水位监测点,全面了解降水情况。

5) 现场不断进行监测。

## 6 结论

发生涌水后,及时了解基坑的稳定性和安全性对后期施工有重要意义。利用有限元对整个开挖过程进行计算,并与实时监测数据进行对比分析。判断涌水等对基坑稳定性的影响程度,以评估基坑整体的安全性能,为以后同类型问题的处理提供参考依据和安全评估方法。

通过对比分析可以得到以下结论:

1) 基坑外土体的变形与水位有必然联系,随着水位降低,土体沉降加快。

2) 受地质条件影响,围檩和立柱均出现一定程度的上升,监测数据的上升幅度高于计算结果,涌水对围檩和立柱有一定影响。

3) 对比计算结果和监测数据,灌注桩受涌水的影响有限;土体深层位移受其影响较大,但采取止水措施后,涌水的影响没有进一步扩大。

4) 第2道支撑轴力的监测值高于计算值,并远高于设计值,涌水对第2道支撑影响较大,在

采取有效措施、安装第 3 道支撑以后，第 2 道支撑轴力得到缓解，未对其它支撑造成影响。

5) 涌水对基坑有一定影响，但在采取必要的措施后，未影响基坑的后期开挖。

6) 针对涌水破坏，增设排水措施，及时采取沙袋反压、双液灌浆等措施可以有效止水堵漏，防止破坏进一步扩张。

参考文献：

[1] 李长山. 杭州地铁秋涛路站东区基坑施工涌水涌砂分析[J]. 土木基础, 2009, 20(1): 11-13.

[2] 孙永玉, 周顺华. 基于离心模型试验的基坑突涌模式及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2 551-2 558.

[3] 施晋. 基于 ANSYS 多支点排桩围护结构的计算[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.

[4] 熊孝波, 孙钧. 润扬大桥南汉北锚碇深基坑工程施工变形智能预测与控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 1 966-1 970.

[5] 祝磊, 孔思丽. 基于 ANSYS 对基坑不同支护结构的计算分析[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(1): 152-156.

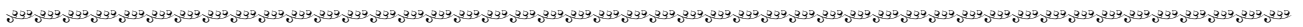
[6] 陈一乔, 陈建航. ANSYS 有限元三维计算分析预测与预控基坑变形技术[J]. 广东土木与建筑, 2011(3): 31-33.

[7] 熊孝波, 桂国庆. 基于 ANSYS 的深基坑围护结构变形数值计算分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009(S1): 1 298-1 305.

[8] 王海涛. 深基坑开挖有限元计算及实测数据分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.

[9] 陈仁鹏, 陈云敏. 粉砂性土体中基坑开挖工程实践[J]. 建筑结构学报, 2001(4): 90-95.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 60 页)

4 结论

1) 大型堆载试验模拟较为理想的柔性基础，荷载分布面积相比地基土厚度较大，地基处于较为理想的一维压缩状态，因而能够更加准确地检验大面积荷载下的真实沉降值。

2) 由 A 区和 B 区沉降曲线可知，在 76.93 kPa (A 区) 和 74.97 kPa (B 区) 荷载作用下，两区的沉降值均小于 50 mm，满足设计要求。

3) 大型堆载试验中，A 区地基土由细粒土和粗粒土组成，而 B 区地基土仅由粗粒土组成。从试验结果中可知，A 区沉降相比 B 区沉降历时更长，沉降量更大。

4) 基于大型堆载试验，运用参数反演的方法可以建立不同土类的 CPT 值与压缩模量之间的关系，从而可以通过 CPT 试验对地基土进行沉降预测，并具备一定的精度。

本课题的沉降预测方法可以运用到多哈新港码头地层组成相似的地基。对于局部出现工程性质差异较大的土类如低塑性粉土等的地基，需要进行另外的试验研究。其他地基处理项目也可以通过大型堆载试验与 CPT 试验建立 CPT 端阻值与压缩模量之间的关系，并由 CPT 试验进行沉降预测。

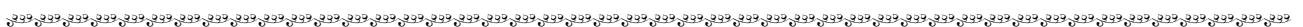
参考文献：

[1] 叶锋, 陈小利, 贺迎喜, 等. 基于 CPT 判别土类及状态在地基检测中的应用[J]. 水运工程, 2013(12): 160-163.

[2] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 91-93.

[3] Lunne T, Robertson P K, Mpowell J J. Cone Penetration Testing[M]. London: Spon Press, 1997: 45-94.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 65 页)

参考文献：

[1] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2013.

[2] 苏国祥, 王简年. 真空预压软基处理工程监测[J]. 港口

技术, 2009, 46(7): 116-119.

[3] 折学森. 软土地基沉降计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

(本文编辑 郭雪珍)