

泵站深基坑支护结构的离心模型试验研究

冯志¹, 沈正龙¹, 孟庆亮¹, 卢庆根¹, 曹天兴¹, 岳夏冰²

(1. 中电建路桥武汉投资发展有限公司, 湖北 武汉 430200; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 由于2016年武汉市政排水出现问题,原定于2019年完工的江南泵站要求提前满足排水条件。为了满足工期要求必须对原定地下连续墙+3道内支撑的支护结构进行优化。为了明确优化后支护方案的可行性,进行了原定支护方案和优化支护方案的离心模型试验,分析了反映基坑稳定的关键变形量,即桩水平位移与弯矩、基坑周边土体沉降,结果发现支护结构变更为大直径钻孔灌注桩+1道内支撑后围护结构水平位移、弯矩以及基坑外地表沉降均有一定程度的增加但仍能确保基坑稳定。研究表明:减少内支撑数量及围护结构刚度会导致支护结构水平位移和地表沉降的最大值有一定程度的增长,水平位移最大值出现位置下移,但是对基坑外地表沉降规律影响较小。研究过程对类似的基坑工程具有借鉴意义。

关键词: 泵站深基坑; 支护结构; 支护设计; 优化分析; 离心模型试验

中图分类号: TV675; TU753

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0183-06

Centrifugal model test of supporting structure of pump station deep foundation pit

FENG Zhi¹, SHEN Zhenglong¹, MENG Qingliang¹, LU Qinggen¹, CAO Tianxing¹, YUE Xiabing²

(1. PowerChina Roadbridge Group Wuhan Investment and Development Co., Ltd., Wuhan 430200, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Drainage problems occurred in Wuhan city in 2016, and the Jiangnan Pump Station was required to be put into use in advance. In order to meet the requirements of the construction period, the original supporting structure of continuous underground-wall plus three inner support must be optimized. In order to clarify validate the feasibility of the new supporting structure, the excavation process of the foundation pit using the original supporting structure and the new supporting structure was simulated, and then the obtained horizontal displacement, bending moment and surface subsidence were compared and analyzed. The test results showed that, the horizontal displacement, bending moment and surface settlement increased to some extent after if the pit support structure change to the form of large diameter cast-in-situ pile plus one inner support, but the stability of the foundation pit can still be ensured. The research results showed that the reduction of the support stiffness and the number of supports have a great impact on the maximum horizontal displacement and surface settlement, and deepen the location where maximum horizontal displacement occurs; however, it will not affect the ground surface subsidence law and the location of the maximum displacement. This research can be used for reference in similar foundation pit engineering.

Key words: pump station deep foundation pit; supporting structure; supporting design; optimization analysis; centrifugal model test

1 研究背景

深基坑支护结构设计是一个较为复杂的岩土工程问题,因设计不当导致的工程事故时有发生,基坑

变形的影响因素众多,如地质条件和水文地质条件、支护方案、围护结构的刚度与嵌入深度、内支撑的形式数量与位置、土方开挖方式等。但是这些因素对基坑变形的具体影响大小及作用机理却仍不明确,

收稿日期:2018-11-07; 修回日期:2019-02-23

基金项目:武汉市BT项目(220021170126)

作者简介:冯志(1979-),男,山西吕梁人,硕士,高级工程师,研究方向为土木工程。

很多设计仍然依赖工程经验、缺乏理论支撑,因此有很多学者对此问题展开了相关研究。

李淑^[1]对北京地区30多个基坑深入分析后,认为钻孔灌注桩的水平变形基本为“中凸形”,水平位移变化范围在5~25mm之间的钻孔灌注桩占79.2%。于洋^[2]利用ABAQUS有限元软件和灰色关联法研究了各基坑支护参数对变形的影响程度,其大小依次为地下连续墙嵌固比、地下连续墙墙体厚度、内支撑间距等。王龙^[3]通过大型有限元软件MIDAS/GTS分析支护结构受力机理,发现基坑内支撑的受力模式受控于内支撑轴力,支护桩内力和弯矩也与内支撑轴力相关联。秦会来等^[4]利用PLAXIS2D软件,研究了各种支护形式的桩墙刚度与水平位移和地表沉降量之间的关系,该研究结果给深基坑支护的优化设计提供了依据。胡强^[5]进行了基坑离心模型试验,发现围护墙的变形与监测数据规律一致,证明了离心模型试验在研究基坑变形方面的有效性。李波等^[6]通过基坑开挖离心模型试验确定了围护结构最大水平位移出现在基坑中下部,并且随着基坑土体的开挖最大水平位移出现位置会向下移动。

虽已有诸多学者展开了研究,但尚未有定论,基坑变形规律与机理仍需深入研究。

2 工程概况

武汉市江南泵站占地面积共5.0 hm²,位于白沙洲大桥和杨泗港长江大桥之间,主要承担武汉市内雨水抽排和尾水排放工作。基坑长115 m,右侧宽21 m,左侧宽68 m,开挖深度11.5~15.8 m。泵站基坑支护结构如图1所示。

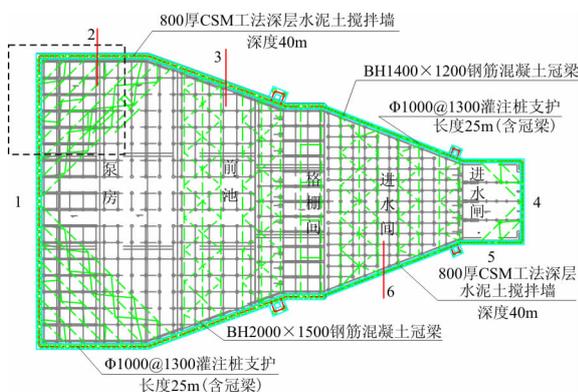


图1 江南泵站支护结构示意图

江南泵站原定围护方案如下:泵房、前池和格栅间区域采用1 m厚32 m长的钢筋混凝土地下连续

墙,进水闸、进水间区域的围护结构为直径1 m、长度25 m的钻孔灌注桩。内支撑支护方案如下:泵房和前池区域采用钢筋混凝土角撑,其余部位采用钢筋混凝土对撑。钢筋混凝土内支撑在左侧泵房、前池区域(开挖深度为15.8 m)布置3道,格栅间、进水间和进水闸区域(开挖深度为11.5 m)布置两道。

江南泵站原定于2019年12月31日竣工。2016年夏天武汉市内雨后出现排水问题,2015年8月武汉市防汛抗旱指挥部一号令要求:江南泵站必须在2017年5月30日之前投入使用,工期被压缩了四分之三。如果仍然采用原定地下连续墙+灌注桩+3道钢筋混凝土内支撑的支护方案,工期无法满足防汛抗旱指挥部一号令要求。因此必须优化原定支护形式以满足工期要求。

依据诸多学者对基坑变形规律及其影响因素的研究,结合江南泵站具体情况与混凝土内支撑、地下连续墙等基坑施工经验,同时充分发挥泵站外圍建筑较远的优势,将原定支护方案中的地下连续墙变更为大直径钻孔灌注桩以提高围护结构的刚度,确保基坑变形与基坑外地表沉降满足要求,将原定3道钢筋混凝土内支撑减少为1道并提高断面以达到减少工期的目的。

由于支护形式与原定方案有较大变动,因此借助长安大学土工离心试验平台,对江南泵站深基坑的支护开挖过程进行模拟,明确支护结构的变形规律,分析各个设计参数对基坑变形的影响大小,最终通过对比新老方案下基坑变形量与相关规范要求,评判新支护方案的可行性。

3 离心模型试验

土工离心模型试验是将研究对象缩小 N 倍,利用土工离心系统产生的离心加速度模拟重力,从而重现研究对象的应力应变过程^[7-8]。土工离心模型试验能够得到与原型相同的应力场和应变场,可以较真实地再现研究对象的变形过程,是岩土工程领域重要的研究手段,应用非常广泛^[9-10]。

3.1 试验模型设计

假定离心模型相似比为 $1:N$,则在试验中应采用的离心加速度为 $N \cdot g$,此时:

$$\frac{\sigma_{zm}}{\sigma_{zp}} = \frac{\rho_m \cdot N \cdot g \cdot z_m}{\rho_p \cdot g \cdot z_p} = 1 \quad (1)$$

式中: σ_{zm} 为模型土体中某一点应力值,MPa; σ_{zp} 为原型土体中相应点应力值,MPa; z_m 为模型中某一点土体深度,m, $z_m = \frac{1}{N}z_p$; z_p 为原型土体中相应点

土体深度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 。

可见离心模型试验中任一点的应力与原型相同^[11]。试验采用与现场相同的土样,具有相同的变形模量,满足模型试验的相似关系。

根据模型试验相似率及相似法则确定的各参数相似比如表 1。

试验中所用土样取自江南泵站现场,按照地勘

报告中含水量与密度经晾晒、加水配置成与原型土性质接近的重塑土,供试验所用^[12-13]。试验中土的物理指标见表 2。

表 1 离心模型试验各参数相似比

长度	重度	应力	应变	时间	惯性
$1/N$	N	1	1	$1/N^2$	$1/N$

表 2 试验土样物理指标

土层	厚度/ m	重度/ $(kN \cdot m^{-3})$	压缩模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
黏土	2.6	18.6	5	0.20	18	11
粉质黏土	5	18	3.5	0.35	14	7
粉质黏土夹粉土	6.7	18	5.5	0.35	15	13
粉质黏土夹粉砂	5.6	18.1	9	0.35	11	21
粉细砂	10	20	23.5	0.25	0	35
黏土	未揭露	20.6	17	0.35	15	18

原支护方案中围护结构为 1 m 厚地下连续墙,新支护方案中围护结构为直径 1.6 m 的钻孔灌注桩。按照模型试验相似比,钻孔灌注桩模型直径为 13 mm,显然不具备可操作性。因研究重点是基坑变形,因此根据刚度等效原则将钻孔灌注桩等效为 1.267 m 厚连续墙。根据相似比,地下连续墙模型厚 $1267/120 = 10.56$ mm,无法采用钢筋混凝土加工。根据相似比关系结合试验经验,使用铝板做为模拟材料,根据抗弯刚度等效原则,铝板材料的厚度如下^[14]:

$$\left[\frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)} \right]_{m_1} = \left[\frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)} \right]_{m_2} \quad (2)$$

式中: E 为钢筋混凝土地下连续墙或者铝板的弹性模量; δ 为材料厚度; μ 为材料的泊松比;下标 m_1 为原型材料,下标 m_2 为模拟材料。

根据公式(2),原支护方案中应采用 6.23 mm 厚铝板模拟地下连续墙,因材料规格原因在试验中实际选用的铝板厚度为 6.00 mm;新支护方案应采用 7.69 mm 厚铝板模拟钻孔灌注桩,因材料规格原因在试验中实际选用的铝板厚度为 8.00 mm。

内支撑包括主梁和连系梁两部分,与地下连续墙相同的原因无法采用原材料制作模型,因此应根据试验目的简化内支撑。连系梁的作用是提高主梁的整体性,因此在试验中简化连系梁只模拟主支撑。根据相似比选取铝条为钢筋混凝土模型材料并依据抗压刚度相似原则计算得到内支撑模型横截面大小如下^[15]:

$$(EA)_{m_1} = (EA)_{m_2} \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; A 为横截面面积; m_1 为原型材料即钢筋混凝土; m_2 为铝板。

根据公式(3),原定支护方案中内支撑模型横截面大小应为 5.51 mm \times 5.51 mm,由于材料规格原因在实际试验中使用的铝条的横截面为 5.50 mm \times 5.50 mm,优化支护方案中内支撑模型横截面应为 5.60 mm \times 5.60 mm,实际试验中选用的铝条横截面也为 5.60 mm \times 5.60 mm。

由于基坑尺寸较大,受模型箱尺寸限制只能结合研究目的与研究重点,选取关键部位进行研究^[11-12]。通过分析可知基坑泵房区域角撑相交位置(如图 1 截面 1 处)支撑最为薄弱,因此选择该区域为研究对象。为增大模拟区域、优化试验效果,根据对称原则,进一步选取泵房区域的一半为模拟对象,如图 1 中虚线区域所示。试验采用模型箱大小为:长 700 mm,高 500 mm,宽 360 mm。根据试验选取的模拟区域大小和模型箱大小,此次离心模型试验相似比定为 $N = 120$ 。

试验首先采用配置好的重塑土样填筑地基,从上到下依次为 22 mm 厚黏土层(相当于实际厚度 2.64 m)、42 mm 厚粉质黏土层(相当于实际厚度 5.04 m)、56 mm 厚粉质黏土夹粉土层(相当于实际厚度 6.72 m)、47 mm 厚粉质黏土夹粉砂层(相当于实际厚度 5.64 m)、84 mm 厚粉土层(相当于实际厚度 10.08 m)和 150 mm 厚黏土层(相当于实际厚度 18 m),共 401 mm 厚。为了实现基坑的支护与开挖

模拟过程,将铝板制成的地下连续墙模型和钻孔灌注桩模型预先埋设到土体当中。地基土样填筑后上机运行 292 min 模拟地基土在自重作用下的固结沉降。固结沉降完成后进行基坑模拟开挖过程。基坑土方开挖方案为分层分步开挖,分层开挖厚度为 42 mm,相当于实际开挖厚度为 5 m。

为了进行对比分析共进行两组试验:试验 1 模拟原支护方案,围护结构为 1 m 厚地下连续墙,沿深度布置 3 道钢筋混凝土内支撑;试验 2 模拟新支护方案,围护结构为直径 1.6 m 钻孔灌注桩,在桩顶布置 1 道钢筋混凝土内支撑。试验 1 与试验 2 选取相同的基坑部位,采用相同的地层构造。

试验 1 的基坑支护与开挖模拟过程如下:地基固结结束停机后首先安装第 1 道铝板制成的钢筋混凝土内支撑模型,开挖第 1 层土体 42 mm 厚(相当于实际厚度 5 m),然后上机运行、离心机转速由 0 增加至 120 g 后运行 6 min,相当于实际开挖工期为 60 d。之后依次设置第 2 层内支撑、开挖第 2 层土体、设置第 3 层内支撑、开挖第 3 层土体,其中第 3 层土体开挖结束后运行 24 min(相当于实际 240 d),观察基坑的变形以确定优化后支护形式的支护效果。试验 2 的模拟过程与试验 1 基本相同,但是只有 1 道内支撑,土层仍分为 3 层开挖,每层开挖厚度为 5 m。制作完成的基坑模型如图 2 所示。

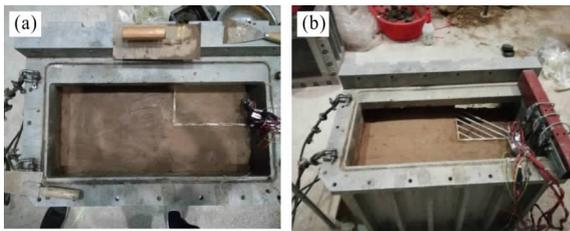


图 2 基坑支护模型与开挖过程

3.2 测量系统的设计

监测系统采用分辨率为 25 μm 的 NCDT1300 型激光位移传感器,能够满足离心模型试验的测量精度要求。通过分析相关学者研究结果结合基坑具体情况,在基坑外沿长边方向布置 10 个激光位移传感器进行基坑外地表沉降的测量,如图 3 中 $c_1 \sim c_{10}$ 所示。为了测量地下连续墙和钻孔灌注桩的水平位移,在围护墙内外两侧分别粘贴了两排共 20 个应变片,粘贴位置如图 3 中 $w_1 \sim w_{10}$ 所示。在试验过程中测量地下连续墙和钻孔灌注桩的应变变化,试验结束后通过应变换算曲率半径间接得到围护结构的水平位移。

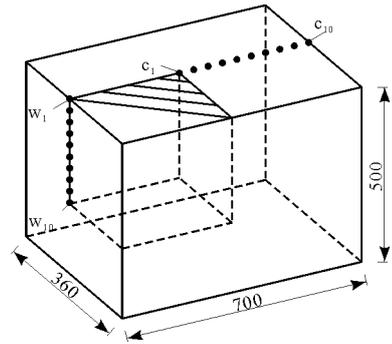


图 3 离心模型试验测点布置(单位:mm)

4 试验成果分析

4.1 围护结构水平位移

图 4 为截面 1 处原支护方案中的地下连续墙和新支护方案中的钻孔灌注桩水平位移曲线对比图,从图 4 中可以看出,两种围护结构的水平位移曲线变化规律基本一致,沿墙身或桩深均表现出先增大再减小的规律,但是地下连续墙各处的水平位移值均比钻孔灌注桩的水平位移值小。在桩顶部地下连续墙水平位移值为 10 mm,钻孔灌注桩水平位移值为 13.5 mm,差值 3.5 mm。地下连续墙与钻孔灌注桩的最大水平位移值分别为 17.0 和 25.5 mm,相差 8.5 mm;最大值出现位置也不同:地下连续墙最大值出现位置距离桩顶 7.5 m ($0.5H$, H 为基坑开挖深度),而钻孔灌注桩最大值出现位置距离桩顶 9 m ($0.6H$),向下移动了 $0.1H$ 。在最大值出现以后两者的水平位移都逐渐降低,并且差值逐渐缩小,在基坑底部水平位移的差值仅有 1.0 mm 左右。通过对比分析可以确定即使采用了较大直径的钻孔灌注桩,对水平位移的限制作用仍然弱于地下连续墙,但是除了最大位移差值略大以外,其他各部位差值均未超过 5 mm。按照《基坑工程技术规程》要求,江南基坑水平位移应在 30 mm 以内,所以虽然优化支护方案中的围护桩变形比原定支护方案中的地下连续墙略大,但是基坑围护结构变形仍然在规范允许范围内,即基坑处于安全状态。

4.2 基坑外地表沉降分析

图 5 为原支护方案与新支护方案基坑外地表沉降曲线对比图。从图 5 中可看出,两种支护方案具有基本相同的基坑外地表沉降变化规律,都显示出随着距离基坑边距离的增加先增大后减小的变化趋势,呈现为“内凹形”,其中沉降最大点均没有出现坑边,而是距离坑边 5 m 左右,即 $0.3H$ 。采用不

同的支护方案对地表沉降范围基本没有影响,大约为 0~25 m 左右,也就是 0~1.7H 范围内。其中 0~5 m(0~0.33H) 范围为沉降增加区域,5~25 m(0.33H~1.7H) 范围为沉降降低区域。

采用新的支护方案后,变化较大的是基坑外地表沉降的最大值。由图 5 可知,原支护方案基坑周边最大沉降为 3.7 mm,新支护方案基坑周边最大沉降为 7.8 mm,增大了约一倍。原因是地下连续墙变更为钻孔灌注桩并减少两道内支撑后,灌注桩水平位移比地下连续墙水平位移大,基坑外围土体相应产生了更大的沉降。按照规范要求(最大地表沉降小于 21.45 mm),地表沉降最大值仍然处在可控范围内,因此新的支护结构设计仍然可以确保基坑的安全稳定。说明基坑支护结构的优化方案是合理的。

4.3 围护结构弯矩分析

图 6 为原支护方案中地下连续墙的弯矩变化图,图 7 为新支护方案中钻孔灌注桩的弯矩变化图。从图 6 和 7 可以看出,地下连续墙和钻孔灌注桩的弯矩沿深度均呈“S”型分布,且弯矩最大值均随土体开挖而逐渐增大。从图 6 可以看出,开挖第 1 层土体时桩身弯矩量值较小。在 5 米处,由于第 2 道内支撑的存在,弯矩有一定程度降低。随着开挖的进行,弯矩极值逐渐增大同时极值位置逐渐下移,而反弯点处于开挖面附近。基坑开挖结束后弯矩极值达到最大,其中最大正弯矩约为 2 800 kN·m、距离墙顶 9.8 m,最大负弯矩约为 3 100 kN·m、距离墙体 19 m。通过图 7 可以看出,钻孔灌注桩的弯矩变

化规律与地下连续墙基本相同,但是弯矩极值比地下连续墙极值要大。钻孔灌注桩的最大正弯矩约为 5 000 kN·m、距离桩顶 10.5 m,最大负弯矩值约为 4 200 kN·m、距离桩顶 20 m。这是由于试验 2 采用的是新支护方案,只在基坑顶部设置一道支撑。这说明内支撑对桩体弯矩影响较大,设计时应慎重考虑桩体弯矩值的变化。

通过以上分析可知,经过优化以后,支护结构水平位移和地表沉降均有一定程度的增加,但是仍然在规范要求以内,可以确保基坑的安全稳定。

5 支护效果分析

按照规范要求对基坑变形过程进行了监测,为了检验新支护方案的支护效果,对比分析了新支护方案水平位移及地表沉降的试验结果与现场监测数据,如图 8 和 9 所示。

从图 8 可以看出,试验结果和实测数据的水平位移变化规律基本相同:随着深度的增加桩身水平位移先逐渐增加,到达极值后逐渐降低并趋于稳定。在试验中最大值为 25.4 mm,距离桩顶 7.6 m,现场实测最大值为 21.9 mm,距离桩顶 10 m,极值相差 3.5 mm。

从图 9 可以看出,在离心模型试验中基坑外地表沉降规律与实测数据基本一致,地表沉降随着距基坑边的距离先增大后减小,在距基坑边 5~6 m 左右达到最大值。实测数据基坑外地表沉降最大值大于试验结果,达到了 11.6 mm。

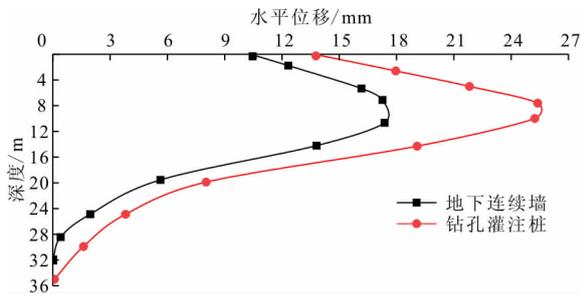


图 4 两种支护方案围护结构水平位移对比图

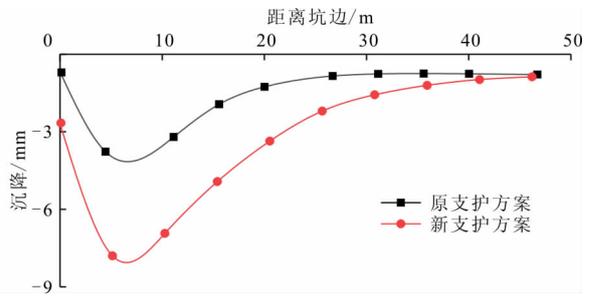


图 5 两种支护方案基坑外地表沉降对比图

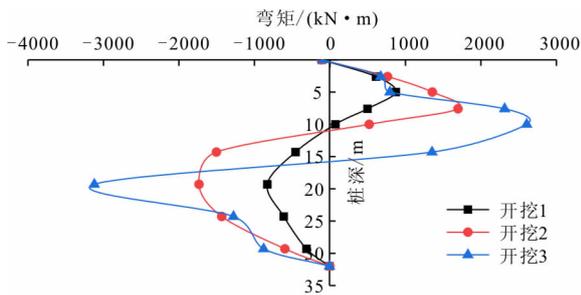


图 6 地下连续墙弯矩图

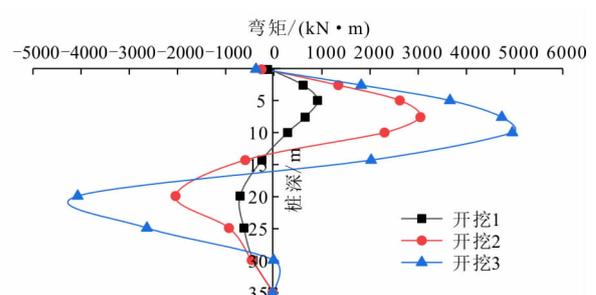


图 7 钻孔灌注桩弯矩图

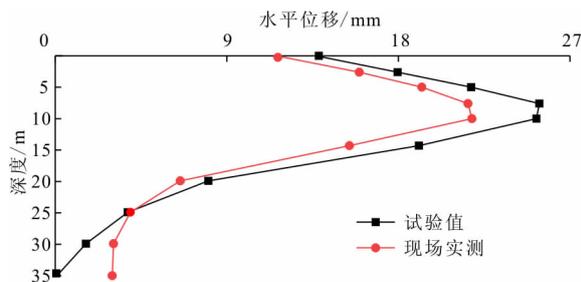


图8 新支护方案水平位移试验值与实测值对比图

根据以上分析可知,优化后的江南泵站支护方案是合理的,可以确保泵站的安全,同时说明离心模型试验在基坑变形研究方面的有效性。

6 结论

借助长安大学土工离心试验平台,进行了江南泵站深基坑离心模型试验,对两种支护方案的支护效果进行了对比分析,得到以下结论:

(1)新支护方案中的钻孔灌注桩水平位移和基坑外地表沉降相比原支护方案均有所增长,但是根据《基坑工程技术规程》要求可知,支护结构优化后基坑围护结构的水平位移与基坑外地表沉降均符合规范要求,基坑是安全的。

(2)将地下连续墙+3道内支撑的支护方式优化为大直径灌注桩+1道内支撑后,围护结构的水平位移整体有一定量的增大,但是幅度较小,特别是在桩顶位置由于内支撑的存在水平位移基本未变。水平位移最大值有所增大且出现位置下移,显示了内支撑对围护结构水平位移的限制作用。

(3)将地下连续墙+3道内支撑的支护方式优化为大直径灌注桩+1道内支撑后,基坑周边地层沉降规律与沉降影响范围保持不变,在 $0 \sim 1.7H$ 范围之间,但是沉降总体有增长,其中最大值增大约1倍,但是仍在安全值以内。

(4)试验结果与现场实测数据基本一致,证实了江南泵站优化支护方案的合理性,同时也说明了离心模型试验是研究基坑变形的有效手段。

参考文献:

- [1] 李淑. 基于变形控制的北京地铁车站深基坑设计方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
- [2] 于洋. 太原粘质粉土及粉质粘土中地铁车站深基坑变

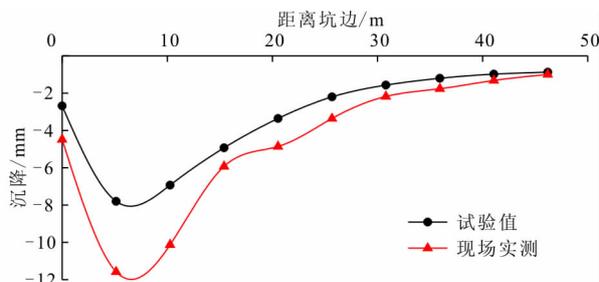


图9 新支护方案地表沉降试验值与实测值对比图

形特征及影响因素研究[D]. 太原:太原理工大学,2016.

- [3] 王龙. 黄土地区地铁深基坑排桩支护受力机理及内支撑轴力优化设计研究[D]. 西安:长安大学,2017.
- [4] 秦会来,张晓春. 支护桩刚度对基坑变形的影响分析[J]. 勘察科学技术,2017(1):1-6.
- [5] 胡强. 深基坑与邻近斜拱桩基相互作用机理离心模型试验[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [6] 李波,王志鹏,龚壁卫,等. 深大坑中坑基围护结构离心模型试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2017,15(4):303-307+313.
- [7] 李连祥,黄佳佳,成晓阳,等. 刚性桩复合地基与临近基坑支护结构相互影响的离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(s2):4142-4150.
- [8] 李波,王志鹏,龚壁卫,等. 深大坑中坑基围护结构离心模型试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2017,15(4):303-307+313.
- [9] 岳夏冰. 外海大回淤沉管隧道软基沉降特征与控制计算研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- [10] 王玉峰,程谦恭,黄英儒. 不同支护模式下黄土高边坡开挖变形离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(5):1032-1046.
- [11] 张晨,蔡正银,徐光明. 冻土离心模型试验相似准则分析[J]. 岩土力学,2018,39(4):1236-1244.
- [12] 李连祥,符庆宏,黄佳佳. 砂土地基和粉质黏土地基基坑悬臂开挖离心模型试验[J]. 岩土力学,2018,39(2):529-536.
- [13] 曹明明,肖昭然. 离心机模型试验中制备砂样的砂雨沉积法[J]. 土工基础,2016,30(4):507-509.
- [14] 冯虎,高丹盈,刘国彬,等. 软土超深基坑失稳破坏的离心模型试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2013,34(5):1-6.
- [15] 马险峰,张海华,朱卫杰,等. 软土地区超深基坑变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(9):1371-1377.