



双排地连墙深基坑对邻近船闸的多因素影响分析*

邵禄文^{1,2}, 张佳强^{1,2}, 任 泉^{1,2}, 张海清^{1,2}

(1. 河北大学, 河北省土木工程监测与评估技术创新中心, 河北 保定 071002;
2. 河北大学 建筑工程学院, 河北 保定 071002)

摘要: 船闸扩容常需在已建船闸附近开挖深基坑, 可能引起已建船闸产生过大附加位移, 进而影响船闸的安全及正常工作。为研究新建基坑对邻近已建船闸的多因素敏感性影响程度, 选取支撑道数、地连墙厚度、地连墙排距和开挖基坑与已建船闸间距4个主要因素, 设计4因素3水平的正交试验, 分别建立对应的数值模型。以船闸水平位移和沉降作为评价指标, 运用极差分析法对上述4个因素进行分析、排序。结果表明, 4个因素中基坑与已建船闸的距离影响最显著, 支撑道数次之, 地连墙厚度和地连墙排距的影响均相对较弱。地连墙排距对船闸位移的影响规律与其他因素不同, 并非呈单调变化趋势, 而是存在一个最优值。在当前所取因素水平范围内, 最优设计参数为支撑道数、地连墙厚度和基坑间距均取最大值, 地连墙排距取中间值15 m。

关键词: 邻近基坑; 双排地连墙; 正交试验; 水平位移

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0192-07

Multi-factor influence analysis of deep foundation pit with double-row diaphragm wall on adjacent ship lock

QIE Lu-wen^{1,2}, ZHANG Jia-qiang^{1,2}, REN Quan^{1,2}, ZHANG Hai-qing^{1,2}

(1. Technology Innovation Center for Testing and Evaluation in Civil Engineering of Hebei Province, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: It is often necessary to excavate a deep foundation pit near the existing ship lock for the expansion of lock capacity, which may cause excessive additional displacement of the adjacent existing lock, and then affect the lock safety and normal operation. To study the multi-factor sensitivity of the newly built foundation pit to the adjacent ship lock, four main factors including the strut levels, the thickness of the diaphragm wall, the row spacing of diaphragm walls, and the distance between the excavation and the ship lock were selected to design 3 levels orthogonal test, based on which series of finite element models were established. The horizontal and vertical displacement of the ship lock was adopted as the evaluation indexes, and the above four factors were analyzed and ranked through range analysis. The results show that among the four factors, the distance between the foundation pit and the ship lock has the most significant influence, strut levels take second place, and the influence of diaphragm wall thickness and row spacing is relatively weak. The influence law of diaphragm wall row spacing on ship lock displacement is different from other factors. The trend of ship lock displacement changing with diaphragm wall row

收稿日期: 2020-10-15

*基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2019201422); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2020439); 河北大学高层次创新人才科研启动经费项目(801260201292)

作者简介: 邵禄文(1966—), 男, 博士, 教授, 从事结构可靠度理论、波浪与建筑物相互作用理论等方面的研究。

spacing is not monotonous, which is different from that of other factors, but there is an optimal value. Within the current factor level range, optimum results can be obtained when the row spacing of diaphragm walls takes the intermediate value of 15 m while the other three factors take the maximum values.

Keywords: adjacent foundation pit; double row diaphragm wall; orthogonal test; horizontal displacement

近年来, 船闸改扩建工程随着航道升级发展不断涌现, 新建船闸基坑对周边既有建筑物的影响问题越来越突出^[1-3]。船闸施工工程地质环境复杂, 邻近已建船闸变形要求严格, 基坑开挖深度大、设计水位高, 对基坑的变形稳定和抗渗性能要求高^[4-6]。刚度较大的双排桩(墙)支护在改扩建船闸基坑中得到越来越广泛的应用, 如蚌埠复线船闸^[7]、株洲航电枢纽二线船闸^[8]以及清远水利枢纽新建1 000吨级二线船闸都采用双排灌注桩或地下连续墙支护。

基坑开挖对邻近已建船闸的影响是船闸改扩建工程中关注的重点问题之一。邻近已建船闸开挖深基坑, 可能引起已建船闸闸首的侧移, 甚至影响已建船闸的正常工作与安全稳定^[9]。邻近已建船闸进行新建船闸基坑施工, 两者之间的距离以及新建基坑的支护方案, 如地连墙排距、厚度、内支撑数量等的变化都可能影响已建船闸的变形响应, 已建船闸的最终变形是这些因素综合作用下的结果。评价这些因素的影响程度, 找出关键因素, 对新建基坑支护方案的选择与优化具有重要意义。由于该问题比较复杂, 影响因素较多, 相关研究以有限元分析方法居多^[10]。但现有研究大多考虑单一因素变化对邻近船闸的影响, 而综合考虑多个因素组合变化影响以及对各因素敏感性影响程度的研究相对较少。本文以邻近已建船闸的双排地下连续墙支护船闸基坑工程为例, 选取基坑前排墙与已建船闸间距(基坑内边线至已建船闸最近的角点处)、地连墙厚度、地连墙排距(前后地连墙中心距离)和支撑道数4个因素和已建船闸的水平位移、沉降2个评价指标, 结合正交试验设计, 通过有限元数值模拟, 研究新建基坑对邻近已建船闸的多因素敏感性影响程度, 为类似工程设计方案优化提供参考。

1 分析方法

1.1 HSS 本构模型

基坑开挖卸载作用下的土体力学行为采用 HS-Small(HSS)模型来描述。HSS 模型是在 Hardening Soil (HS) 模型的基础上引入土体小应变刚度特性, 该模型能够区分土体在加载和卸载条件下的刚度差异, 还考虑了小应变范围内土体剪切模量随应变增大而衰减的特点^[11-13]。HSS 模型对软土到较硬土等多种土类都适用, 计算结果能同时给出较为合理的墙体变形及墙后土体变形, 适用于深基坑工程的精细数值分析^[14]。

HSS 模型除了需要输入 HS 模型原本需要的11个参数外, 又增加了2个小应变参数, 即小应变刚度试验的参考初始模量 G_0^{ref} , 和割线剪切模量衰减到初始剪切模量70%时所对应的剪应变 $\gamma_{0.7}$ 。参数 G_0^{ref} 对基坑变形量和变形形态都有重大影响, 它可以根据共振柱试验结果结合上式获得, 也可以基于室内试验及工程实测数据反分析, 建立 G_0^{ref} 与 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 等其他刚度参数之间的地区经验关系进行估算。参数 $\gamma_{0.7}$ 可以通过试验获得的剪切模量-剪切应变关系曲线确定。 $\gamma_{0.7}$ 的数量级在 1×10^{-4} 左右, 一般黏土和砂土的 $\gamma_{0.7}$ 可以在 $(1 \sim 3) \times 10^{-4}$ 范围内取值。本文所参考的算例未提供相关试验数据, 土体计算参数根据文献中的经验关系取值。

1.2 正交试验设计

根据以往分析经验及相关研究, 支撑数量、双排墙排距及地连墙厚度均对基坑变形有一定影响, 新建基坑与既有建筑物的距离则直接关系到既有结构是否处于基坑开挖的主要影响区内。据此, 考虑基坑内支撑数量(A)、地连墙厚度(B)、双排墙排距(C)和基坑间距(D)4种因素, 每个因素取3个水平, 设计 $L_9(3^4)$ 正交试验(表1.2), 其中 H 为基坑开挖深度。

表 1 正交试验因素水平

水平	因素			
	A/道	B/m	C/m	D/m
1	1	0.8	12	2H
2	2	1.0	15	3H
3	3	1.2	18	4H

表 2 $L_9(3^4)$ 正交试验方案

工况	因素			
	A/道	B/m	C/m	D/m
1	$A_1(1)$	$B_1(0.8)$	$C_1(12)$	$D_1(2H)$
2	$A_1(1)$	$B_2(1.0)$	$C_2(15)$	$D_2(3H)$
3	$A_1(1)$	$B_3(1.2)$	$C_3(18)$	$D_3(4H)$
4	$A_2(2)$	$B_1(0.8)$	$C_2(15)$	$D_3(4H)$
5	$A_2(2)$	$B_2(1.0)$	$C_3(18)$	$D_1(2H)$
6	$A_2(2)$	$B_3(1.2)$	$C_1(12)$	$D_2(3H)$
7	$A_3(3)$	$B_1(0.8)$	$C_3(18)$	$D_2(3H)$
8	$A_3(3)$	$B_2(1.0)$	$C_1(12)$	$D_3(4H)$
9	$A_3(3)$	$B_3(1.2)$	$C_2(15)$	$D_1(2H)$

2 数值模型验证

2.1 有限元模型及相关参数

有关研究通过有限元数值模拟论证了带撑双排

地下连续墙支护方案的可行性及地连墙排距、连板厚度、前排墙入岩深度、内支撑刚度及支撑道数等单一因素变化对结构变形受力以及邻近船闸水平、沉降的影响^[15]。本文在前述工作基础上进行多因素组合变化影响下邻近船闸变形响应规律的研究。

拟新建船闸闸室段基坑宽 65 m, 深约 15 m, 支护形式采用地下连续墙+坑内 2 道钢筋混凝土支撑, 支撑的水平间距为 4.25 m, 两道支撑纵向轴线间距为 5.09 m, 支撑的高度和宽度分别为第 1 道 1.0 m×1.1 m, 第 2 道 1.2 m×1.1 m, 正交试验中所设第 3 道支撑和截面与第 2 道支撑相同, 与第 2 道支撑轴线间距为 7.26 m, 基坑边缘与一线船闸中心轴线距离不足 90 m, 一线船闸闸室底板边缘距离二线船闸基坑边缘仅 38 m, 基坑两侧土体采用高压旋喷桩进行加固, 前排墙位于中风化岩顶部, 后排墙嵌入岩层 3 m 并布设帷幕灌浆。基坑典型剖面见图 1。

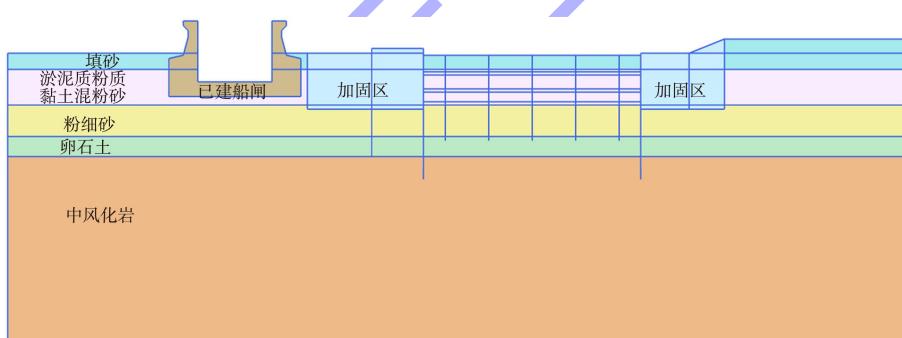


图 1 基坑典型剖面

根据上述典型剖面, 建立如图 2 所示的平面应变有限元模型进行基坑开挖过程模拟。为降低边界条件对计算结果的影响, 模型尺寸设置为 280 m×90 m, 基坑开挖深度为 15 m, 限制模型两侧水平位移, 底部固定, 顶部自由。地下连续墙、连板、内支撑及立柱采用板单元模拟, 已有船闸采用实体单元模拟。采用 15 节点高阶三角形单元划分实体网格。围护结构与土之间设置界面单元, 界面强度折减因子 R_{inter} 取 0.8。基坑外水位条件为全局水位, 埋深 1 m, 开挖过程中仅考虑静水压力, 坑内外水压力差按线性内插设置, 基坑开挖到底后, 进行一次稳态渗流计算。中风化岩和加固区土体本构模型

采用 HS 模型, 其他土体选用 HSS 模型, 土体计算参数根据文献[13-14]中的经验关系取值, 见表 3。基坑开挖前, 邻近已建船闸、地连墙、立柱等相关支护结构体系均已激活, 并位移清零, 基坑开挖模拟施工过程如下: 施工第 1 道内支撑, 开挖深度 5.74 m→施工第 2 道内支撑, 开挖深度 5.26 m→开挖至坑底, 深度 10 m。

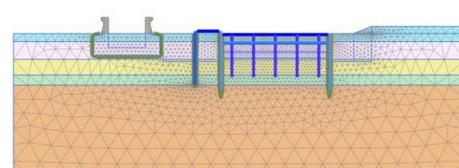


图 2 有限元模型网格

表3 岩土体物理力学参数取值

土层	本构模型	$\rho / (\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	c / kPa	$\varphi / (\circ)$	$\psi / (\circ)$	$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	m	$G_0^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$\gamma_{0.7}$
填砂	HSS	1.60	1.0	25.0	0.0	6.0	6.0	36.0	0.5	60	0.000 10
淤泥质粉质黏土混粉砂	HSS	1.75	12.0	25.0	0.0	5.4	3.6	28.8	1.0	72	0.000 10
粉细砂	HSS	1.70	1.0	32.0	0.0	12.0	12.0	45.0	0.5	90	0.000 15
卵石土	HSS	2.00	1.0	38.0	6.0	45.0	45.0	120.0	0.5	300	0.000 10
中风化岩	HS	2.00	60.0	35.0	2.0	160.0	160.0	500.0	0.5	-	-
加固土体	HS	1.80	40.0	24.0	0.0	30.0	30.0	90.0	0.5	-	-

注: ρ 为土的密度; c 为土体黏聚力; φ 为土的内摩擦角; ψ 为土的剪胀角; E_{50}^{ref} 为三轴排水剪切试验的参考割线模量; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为固结试验中的参考切线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为三轴排水剪切试验的参考加卸载模量; m 为刚度应力水平相关幂指数; G_0^{ref} 为小应变刚度试验的参考初模量; $\gamma_{0.7}$ 为割线剪切模量衰减到初始剪切模量 70% 时所对应的剪应变。

2.2 数值模型验证

基坑开挖到底后, 双排墙侧移计算值与实测值对比如图 3 所示。从图 3 可知, 前排墙侧移极值 27.7 mm, 与实测值接近; 从变形趋势看, 前排墙侧移曲线与实测侧移曲线基本一致, 近似呈弓形分布。后排墙最大侧移计算值 13.4 mm, 出现在坑底附近, 实测曲线近似呈抛物线形, 侧移

极值出现在坑底上方, 两者略有偏差。计算得到的船闸位移场分布情况如图 4 所示, 船闸右侧墙顶最大水平位移 6.04 mm, 右墙外侧中下部最大沉降 3.50 mm, 均与实测值较为相符, 可见总体上前面建立的有限元模型及采用的计算参数较为合理, 可以在此基础上进行双排墙支护条件下多个因素对邻近船闸位移的敏感性分析。

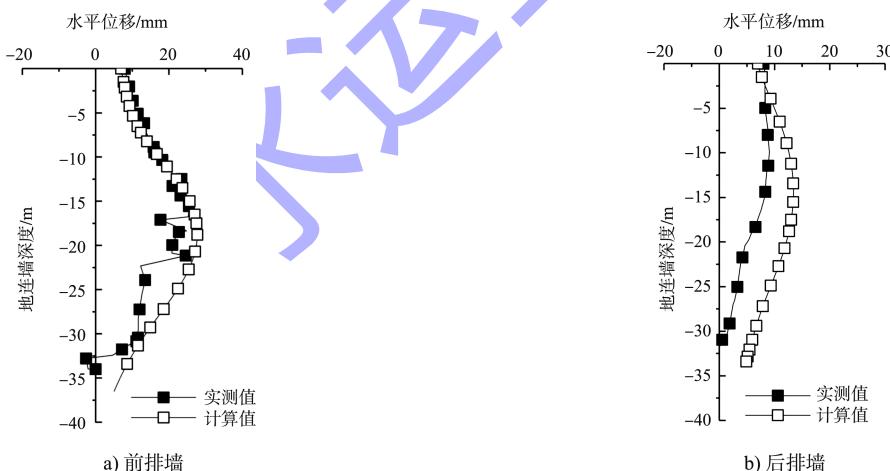


图3 墙体侧移对比

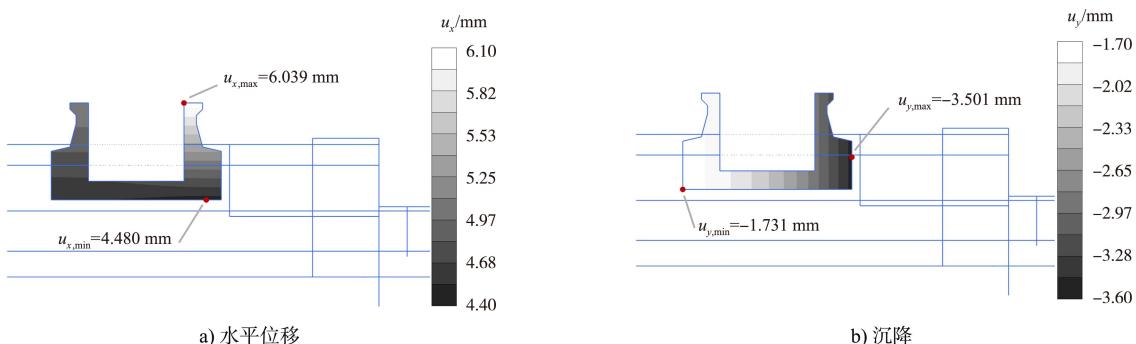


图4 基坑位移云图

3 结果分析

3.1 位移极值

在 9 种计算工况下，深基坑开挖引起的邻近已建船闸水平位移和沉降最大值见图 5。由图 5a) 可见：工况 1 和工况 5 条件下基坑开挖引起的邻近船闸的水平位移相对较大，分别达到 10.02 mm 和 7.11 mm；工况 9 和工况 2 次之，船闸水平位移极值分别为 5.47 mm 和 4.95 mm，其余工况船闸水平位移总体在 4 mm 以内。结合表 2 可知，船闸水平位移较大的工况 1、5、9 均为基坑间距 $D=30$ m，新建基坑与已建船闸距离相对最近，表明基坑间距可能是邻近船闸位移响应的主控因素；同时可知，在 $D=30$ m 不变的条件下，随着支撑数量 A 、地连墙厚度 B 和地连墙排距 C 等其他因素水平的提高，船闸水平位移极值有所降低。工况 8 条件下的船闸水平位移极值最小，仅 2.88 mm，此时 $A=3$, $B=1.0$ m, $C=12$ m, $D=60$ m，除了支撑数量 A 和基坑间距 D 取最大水平，地连墙厚度 B 和地连墙排距 C 取值均为中等水平，这一方面说明支撑道数和基坑间距可能是影响船闸水平位移的主控因素，另一方面说明基坑开挖引起的邻近船闸水平位移并非随着上述因素单调变化，进一步表明多因素敏感性分析的必要性。

从图 5b) 可知，其总体变化趋势与船闸水平位移随工况条件的变化规律基本一致，工况 1 和工况 5 条件下船闸沉降量相对最大，工况 8 对应的船闸沉降量最小，说明邻近船闸的竖向和水平变形对于所选的 4 种因素具有大体一致的敏感性，基坑间距 D 可能是船闸沉降变形的主控因素。

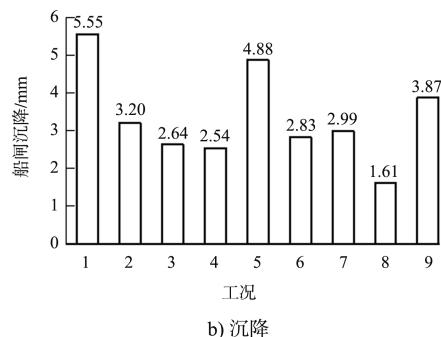
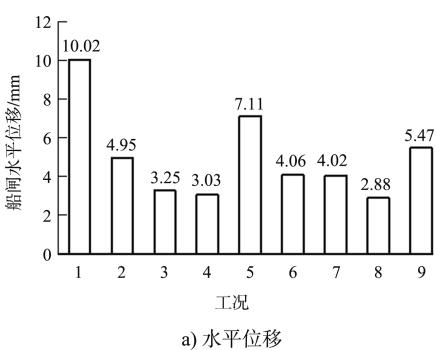


图 5 各工况下船闸水平位移和沉降最大值

3.2 极差分析

极差是指一组数据中最大与最小数据之间的差，可反映该组数据的离散程度。在正交试验结果分析中，极差可作为评价因素显著性的参数，其大小表明该因素的水平改变对试验结果的影响程度。极差越大，说明该因素的水平改变对试验结果影响也越大，极差最大的因素就是最主要的因素；极差越小的因素虽然不能说是不重要因素，但至少可以肯定当该因素在所选用的范围内变化时，对该指标影响不大^[16]。

选取邻近船闸水平位移、沉降 2 个指标进行极差分析，结果见表 4。其中 K_i ($i=1, 2, 3$) 为某一水平下，对应因素的试验结果之和； r_i ($i=1, 2, 3$) 为某一水平下，对应因素的试验结果的平均水平； R 为平均水平的极差。根据试验结果平均值 r_i 、极差 R 的大小，确定对应指标的最优方案。

由表 4 可知，对于船闸水平位移，基坑间距为其显著影响因素，支撑道数次之，地连墙厚度和前后墙的排距影响相对较弱，它们的因素最佳水平均为 $D_3A_3B_3C_2$ ；对于船闸沉降，其受各因素的影响规律与船闸水平位移相似，其显著影响因素为基坑间距，支撑数量，地连墙厚度和前后墙排距对其影响均比较弱，其最佳因素水平亦为 $D_3A_3B_3C_2$ 。

表4 位移极差分析

指标	船闸水平位移/mm				船闸沉降/mm			
	A	B	C	D	A	B	C	D
K_1	18.22	17.07	16.96	22.60	11.39	11.08	9.99	14.30
K_2	14.20	14.94	13.45	13.03	10.25	9.69	9.61	9.02
K_3	12.37	12.78	14.38	9.16	8.47	9.34	10.51	6.79
r_1	6.07	5.69	5.65	7.53	3.80	3.69	3.33	4.77
r_2	4.73	4.98	4.48	4.34	3.42	3.23	3.20	3.01
r_3	4.12	4.26	4.79	3.05	2.82	3.11	3.50	2.26
R	1.95	1.43	1.17	4.48	0.97	0.58	0.30	2.50
水平主次	3 2 1	3 2 1	2 3 1	3 2 1	3 2 1	3 2 1	2 1 3	3 2 1
因素主次	$D > A > B > C$				$D > A > B > C$			
最优方案	$D_3A_3B_3C_2$				$D_3A_3B_3C_2$			

除了极差分析表外, 指标趋势图能够更直观地呈现出各指标随不同因素水平的变化趋势, 根据极差分析结果绘制其直观变化趋势如图6所示。从图6可以看出, 船闸水平位移和沉降随各因素水平的变化规律大体一致, 随着支撑数量、地连墙厚度及基坑间距的增大, 船闸水平位移和沉降都呈近似线性下降趋势, 其中基坑间距增加时, 船闸水平位移和沉降下降趋势最为明显。同时可以看到, 基坑间距从 $2H$ 增大到 $3H$ 的船闸位移下降幅度比基坑间距从 $3H$ 增大到 $4H$ 时要大。地连墙排距对船闸水平位移和沉降的影响规律与其他因素不同, 当地连墙排距增加时, 船闸水平位移和沉降均呈现先减小后增大的趋势。这是由于, 排距过小时, 前后墙与连板组成的结构空间性能较弱, 不能充分发挥连板的协调变形和受力的作用; 当排距过大时, 墙间土不能很好地传递地连墙的受力, 双排墙的整体受力和变形性能不佳; 当排距在合理范围内时, 墙两侧土压力分布较为合理, 前后墙与连板及墙间土形成刚度较大、受力变形性能较好的整体空间结构, 可充分发挥抑制基坑变形的作用。

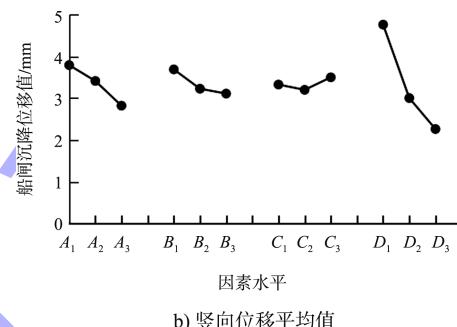
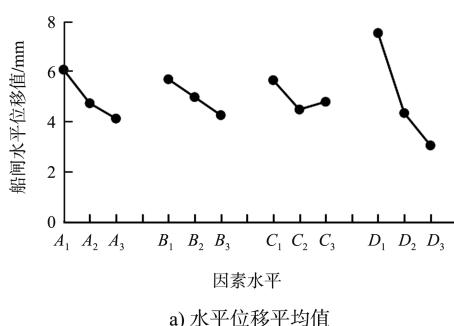


图6 位移指标随因素水平变化趋势

总体上, 支撑数量越多、地连墙越厚、基坑间距越大, 邻近已建船闸的水平位移和沉降越小, 这与一般认识相符。已建船闸到新开挖基坑的距离是船闸位移的主控因素, 距离基坑越近受的影响越大, 距离基坑越远则会远离基坑开挖主要变形影响区, 减小受基坑开挖扰动的影响。在满足各项功能需求的条件下, 新建基坑应在空间限制范围内尽量远离已建船闸, 对本例而言, 二者间距若能达到 $3H$ 以上则能大幅减轻基坑开挖对船闸的影响。此外, 支撑数量越多、地连墙越厚, 则基坑围护体系的刚度越大, 对基坑变形控制的效果越好, 当然在实际工程中还需综合考虑施工成本、难度和便利性等方面的影响。

在正交试验多因素组合条件下, 双排墙的排距对邻近船闸的影响并非单调变化, 这与文献[15]中的单因素分析结果有所差异, 说明不能通过一味增加排距来控制船闸位移, 对于特定的内撑式双排墙支护设计方案存在一个较优的排距。

综上所述, 由极差分析可以确定在当前所取因素水平范围内, 邻近已建船闸的双排墙深基坑



a) 水平位移平均值

的最优设计参数为 $D_3A_3B_3C_2$, 即支撑数量、地连墙厚度和基坑间距均取最大值, 但地连墙排距取中间的 15 m。

4 结语

1) 开挖基坑与已建船闸之间的距离是邻近船闸位移响应的最显著影响因素, 支撑数量次之, 地连墙厚度和地连墙排距的影响程度均相对较弱。在满足各项功能需求的条件下, 新建基坑应尽可能远离已建船闸, 以减轻对已建船闸的影响。

2) 与单因素变化分析结果不同, 考虑多因素组合变化条件下, 邻近船闸位移随地连墙排距的增加并非呈单调下降的趋势, 而是先减后增, 即对于特定的内撑式双排墙支护设计方案存在一个最优排距, 不能一味取大值。

3) 在当前所取因素水平范围内, 当支撑数量、地连墙厚度和基坑间距均取最大值, 但地连墙排距取中间的 15 m 时, 方可得到最优结果。修建二线船闸时, 应优先考虑其到已建船闸的距离, 其次根据已建船闸的变形控制值及施工情况选择合适的支撑数量、地连墙厚度和排距。

参考文献:

- [1] 储诚富, 董满生, 胡晴, 等. 船闸基坑边坡中桥梁基桩力学特性研究[J]. 工程力学, 2015, 32(5): 57-63.
- [2] 王志鹏, 曹周红, 祝伟程, 等. 船闸深基坑开挖对桥桩边坡应力的影响[J]. 水运工程, 2019(3): 146-153.
- [3] 姜燕, 杨光华, 谢志杰, 等. 清远二线船闸典型基坑支护结构计算分析[J]. 广东水利水电, 2020(2): 20-28.
- [4] 徐志峰, 王玉波, 魏超. 不同条件下船闸工程基坑支护与防渗方案的选择[J]. 水运工程, 2016(12): 71-75.
- [5] 赵忠伟, 陶小虎, 李英玉, 等. 某船闸二期基坑工程三维渗流场分析[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(12): 135-136.
- [6] 罗翔, 永新, 曾理菁, 等. 带撑双排地下连续墙支护结构在清远枢纽航道扩容工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 215-219.
- [7] 王昆. 深基坑双排桩支护技术在某船闸工程中的应用[J]. 水运工程, 2010(7): 121-124.
- [8] 邹开明, 姜兴良, 王勤振. 株洲二线船闸深基坑双排桩结构的受力特性[J]. 水运工程, 2019(3): 83-88.
- [9] 罗鹏飞, 刘晓平, 曹周红, 等. 邻近船闸基坑开挖安全影响因素[J]. 水运工程, 2016(4): 113-117.
- [10] 潘宣何, 刘晓平, 林积大, 等. 基坑开挖对邻近船闸的影响研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(11): 87-90.
- [11] SCHANZ T, VERMEER A, BONNIER P. The hardening soil model: formulation and verification[C] // Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Amsterdam: Balkema, 1999: 281-296.
- [12] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.
- [13] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269-278.
- [14] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766-1774.
- [15] 孔维美. 深基坑带撑双排地下连续墙支护结构性状及其对邻近船闸的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [16] 贾超, 张凯, 张强勇, 等. 基于正交试验设计的层状盐岩地下储库群多因素优化研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1718-1726.

(本文编辑 郭雪珍)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www.syge.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。