

基坑工程施工对邻近防汛墙安全影响分析

于瑞东¹, 邹 丹¹, 闫程晟²

[1.上海市堤防泵闸建设运行中心,上海市 200080; 2.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要:上海地属滨江临海,地势低平,防汛墙作为抵御洪水的第一道防线,是确保人民生命财产安全的首要屏障,关乎长远利益。如若防汛墙出现险情,将会产生严重后果。近年来,本市在河道及堤防管理范围外的施工项目越来越多,基坑开挖施工对临近防汛墙造成的安全隐患问题逐步凸显。据查,针对黄浦江市区防汛墙保护范围内的基坑开挖施工具有明确管理规定,但缺少对防汛墙保护范围外的相关规定,这导致此类安全隐患无法提前预防,亟需开展系统研究以提供管理依据和技术支撑。通过对理论分析方法的比选,最终确定使用有限元分析作为理论基础与分析方法,通过回归分析等数据分析方法总结结果规律,最终分析基坑施工对防汛墙影响规律,供堤防管理使用。

关键词: 基坑工程;地下工程;防汛墙;有限元分析;HSS 模型

中图分类号: TV87;TU753 **文献标志码:** B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0234-05

0 引 言

上海地属滨江临海,地势低平,防汛墙作为抵御洪水的第一道防线,是确保人民生命财产安全的首要屏障,关乎长远利益。如若防汛墙出现险情,将会产生严重后果。

近年来,本市在河道及堤防管理范围外的施工项目越来越多,基坑开挖施工对临近防汛墙造成的安全隐患问题逐步凸显^[1]。据查,现行文件对黄浦江区防汛墙保护范围内的基坑开挖施工做了明确规定,但缺少对防汛墙保护范围外的相关规定,这导致此类安全隐患无法提前预防,亟需开展系统研究以提供管理依据和技术支撑。

本课题用理论计算、数值方法等手段,结合工程实际,对上海软土地区基坑开挖对邻近防汛墙的安全性作出分析,旨在研究基坑开挖施工对临近防汛墙的安全影响,得出主要敏感参数,提出相应的控制指标要求,为黄浦江、苏州河沿线防汛墙安全运行管理和保护提供理论依据。

1 研究区概况

黄浦江堤防指黄浦江主河道及汇入各级支流到

第一座水闸或已确定的支流河口延伸段两岸的防护堤。按照堤防建设年代及建设标准划分,可将黄浦江堤防分为市区段、上游干流段及上游支流段,具体划分如图 1 所示。

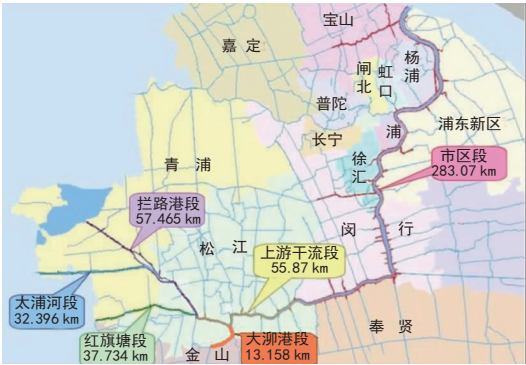


图 1 黄浦江沿线堤防分布图

苏州河中上游主要指苏州河“真北路—蕴藻浜”段,苏州河下游主要指苏州河“真北路桥—外白渡桥”段。苏州河沿线堤防分布图如图 2 所示。



图 2 苏州河沿线堤防分布图

2 研究方法及边界条件

2.1 研究方法

基坑工程施工一般经历 3 个阶段:围护结构施工

收稿日期: 2023-10-26

作者简介: 于瑞东 (1979—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 从事水利工程管理工作。

通信作者: 闫程晟 (1997—), 男, 硕士, 工程师, 从事水工结构设计工作。电子邮箱: yanchengsheng@smedi.com

阶段、基坑挖掘前的预降水阶段以及基坑挖掘阶段。这三个阶段的施工都可能导致周边地层发生位移^[2-3],会导致周围建(构)筑物产生不同程度的附加变形,若附加变形过大,可能造成结构裂缝和损坏,进而影响建(构)筑物的正常使用^[4]。

对于模拟基坑开挖问题,连续介质有限元法是一种有效的方法,它将基坑工程及其周围环境视为一个相互作用的系统。该方法可以考虑诸如土层分层、土壤性质、土层开挖和支护结构施工过程以及周边建(构)筑物影响等复杂因素^[5]。因此,本文采用有限元分析方法,不仅计算精度高,而且适用于各种复杂形状,已获得广泛认可^[2]。本次研究使用国际上通用的岩土工程有限元分析软件 PLAXIS。

针对各种不同的土壤类型,人们提出了相应的本构模型来描述其力学特性,由于土壤类型的丰富多样性,本构模型的数量也非常多^[6]。HSS 模型在基坑开挖分析中具有较好的适用性。研究采用上海《基坑工程技术标准》中推荐的 HS-Small 模型主要参数的取值方法。模型屈服面描述如图 3 所示。

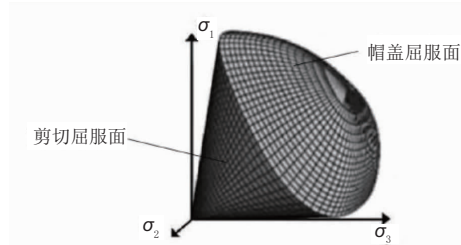


图 3 HSS 模型屈服面描述简图

2.2 边界条件

为了使本文的结果更加具有针对性,同时聚焦研究方向,形成切实可用的研究成果,对相关边界条件进行如下限定。

(1)关于基坑开挖过程:由于基坑工程相应的变形指标在基坑相关规范中已经有所规定。因此,本课题不对基坑围护结构、支撑体系、坑底加固进行重点研究,仅对满足基坑规范规定变形控制指标下的基坑开挖过程进行研究。

(2)关于研究范围的定义:本次研究结合相关规范和工程实例,将临近防汛墙研究范围定义为防汛墙陆域侧 100 m 范围内。

(3)关于研究的防汛墙类型:黄浦江、苏州河堤防结构形式以高桩承台式防汛墙为主。高桩承台式防汛墙具有典型代表性,本课题研究对象确定为高桩承台式防汛墙。同步分析堤式结构、L 形挡墙、重力式挡墙的不同影响。

(4)确定的控制指标参数:对于已建成的高桩承台防汛墙工程,在不改变其他条件,仅临近防汛墙进行基坑开挖施工时,最重要的控制指标参数为防汛墙的变形控制指标。上海市地方标准《防汛墙工程设计标准》对防汛墙的沉降以及水平位移有严格的要求。因此本文所确定的研究参数指标为变形指标,包括防汛墙沉降及桩基泥面处水平位移。

3 基坑施工对防汛墙安全影响分析

本文以变形控制为指标,研究分析满足基坑规范规定变形控制指标下的基坑开挖过程对防汛墙的影响。主要从相同基坑不同防汛墙结构形式的影响、不同基坑结构尺寸的影响、不同基坑支护结构的影响、不同基坑深度的影响、与防汛墙距离不同的影响,这 5 个方面入手,分析基坑施工对防汛墙安全影响。

3.1 防汛墙结构型式的影响

为了分析防汛墙墙身结构型式的影响,本次研究建立了 3 种简化模型,3 种简化模型仅墙身结构型式不同,建立模型分别为如图 4 所示。

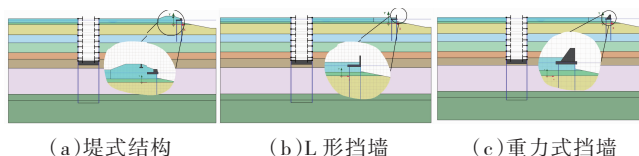


图 4 不同防汛墙墙身结构型式有限元模型

图 4(a)为堤式结构防汛墙,在黄浦江中上游堤防防洪能力提升工程中为典型断面,图 4(b)为 L 形挡墙结构,图 4(c)为重力式挡墙结构,其他变量保持不变(与防汛墙距离 35 m、基坑深度 20 m)。具体结果如图 5 所示。

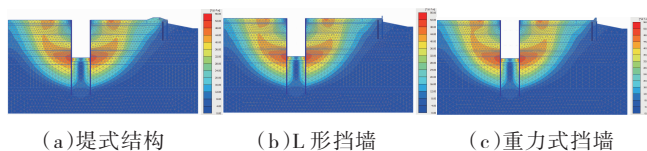


图 5 不同防汛墙墙身结构型式总变形云图

根据上述结果,可以得出以下结论。

(1)3 种防汛墙断面形式在基坑附近的总变形、水平变形、垂直变形云图分布规律大致相同,仅在防汛墙附近有所不同。

(2)总变形主要表现为靠近基坑底部变形两侧、基坑附近地表土体变形较大,向四周扩散减小。

(3)不同防汛墙结构型式位移分析结果如图 6 所示。防汛墙处的位移主要反映在:a.堤式结构水平位移为 -8.125 mm ,垂直位移为 -12.560 mm ;b.L 形挡土墙

水平位移为 -8.251 mm , 垂直位移为 -1.954 mm ; c. 重力式挡土墙水平位移为 -7.937 mm , 垂直位移为 -2.139 mm 。

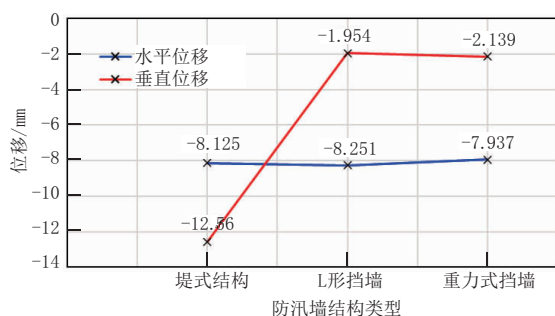


图6 不同防汛墙结构型式位移分析图

(4)通过对比不难发现,从变形的角度而言,可以认为L形挡墙结构和重力式挡墙两种防汛墙的变形规律和数值一致,堤式结构的水平位移与L形挡墙结构与重力式挡墙相同,但是土堤堤顶处垂直位移明显较大,基坑工程施工引起堤式结构堤防沉降较大,这可能与堤式结构自身填土沉降有关。进一步分析堤式结构的一级防汛墙承台处垂直位移为 2.468 mm , 与L形挡墙结构和重力式挡墙的垂直位移大致相同。可以确定,堤式结构在应对基坑开挖造成沉降方面的适应性不如L形挡墙结构和重力式防汛墙。

3.2 不同基坑结构尺寸的影响

本小节分析不同基坑尺寸对防汛墙的影响,本次研究以深 20 m 基坑为例,保证堤防距离基坑边缘距离不变(即基坑右侧距离河口线的距离为 35 m 不变),建立基坑宽度不同的有限元模型,具体如图7所示。

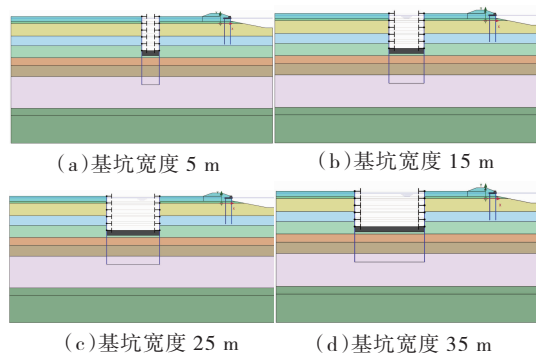


图7 不同基坑结构尺寸有限元模型

基坑宽度由 5 m 变化为 35 m , 具体结果如图8所示。根据上述计算结果,可以得出以下结论。

(1)随着基坑宽度的加大,基坑施工造成的土体总位移的影响范围都逐渐增大。主要表现为由于基坑变大而带来的影响范围变大,但是如果从基坑边缘起算,则影响范围变化并不大。总变形主要表现为靠近基坑底部变形两侧、基坑附近地表土体变形较

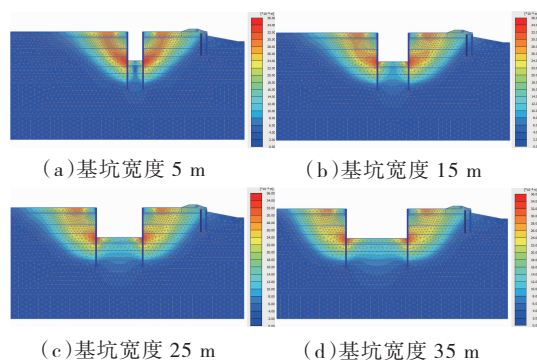


图8 不同基坑结构尺寸总变形云图

大,向四周扩散减小。

(2)对于本文重点关注堤防位置处的水平位移和堤防沉降结果如图9所示。由于保证堤防距离基坑边缘距离不变,因此堤防的位移不随基坑宽度变化而变化。因此,基坑尺寸不同对防汛墙的影响变化不大。

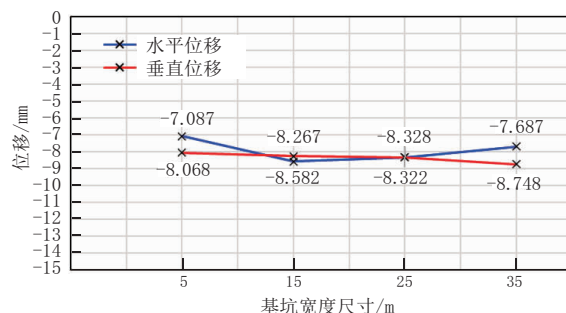


图9 不同基坑尺寸引起的位移分析图

3.3 不同基坑支护结构的影响

基坑工程设计方案应根据工程地质与水文地质条件、环境条件、施工条件以及基坑使用要求与基坑规模等因素,通过技术与经济比较确定^[7]。本文采用基坑深度为 5 m 的浅基坑作为研究对象,与防汛墙距离 35 m 保持不变,研究不同基坑支护形式对防汛墙的影响,包括复合土钉支护、水泥土重力式围护墙、板式支护体(无冠梁)、板式支护体(有冠梁)4种。建立模型如图10所示。

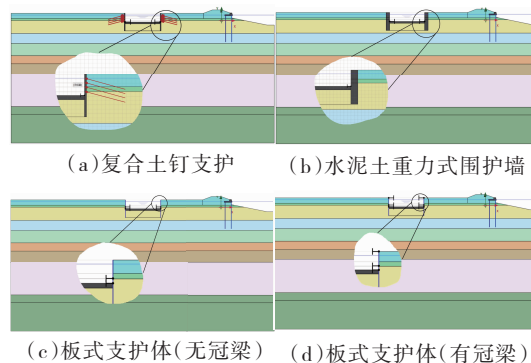


图10 不同基坑尺寸引起的位移分析图

本文采用基坑深度为 5 m 的浅基坑作为研究对象,符合复合土钉支护、水泥土重力式围护墙、板式

支护体(无冠梁)、板式支护体(有冠梁)四种支护结构的适用条件。经过分析发现,由于基坑深度较浅,导致堤防结构的水平、垂直位移都比较小。具体结果如图 11 所示。

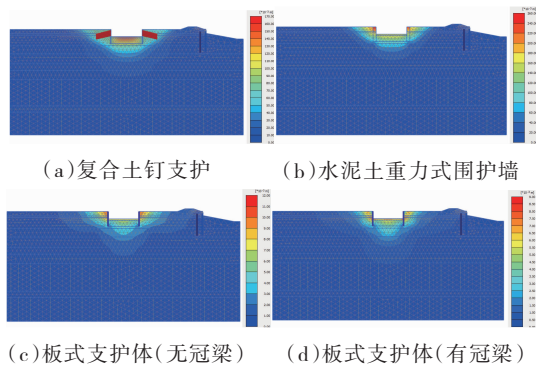


图 11 不同基坑支护结构总位移变形云图

复合土钉支护水平位移为 -0.351 mm ,垂直位移为 -0.656 mm ; 水泥土重力式围护墙水平位移为 -0.447 mm ,垂直位移为 -0.656 mm ;板式支护体(无冠梁)水平位移为 -0.565 mm ,垂直位移为 -0.838 mm ;板式支护体(有冠梁)水平位移为 -0.465 mm ,垂直位移为 -0.039 mm 。其位移对比如图 12 所示。

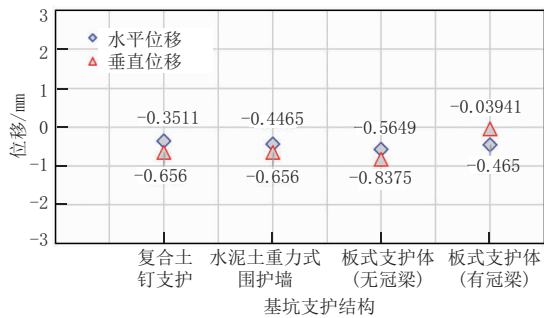


图 12 不同基坑支护结构位移对比图

3.4 不同基坑深度的影响

基坑深度不同会对防汛墙产生不同的影响,因此本小节主要研究不同基坑深度对防汛墙的影响。建立的模型如图 13 所示。

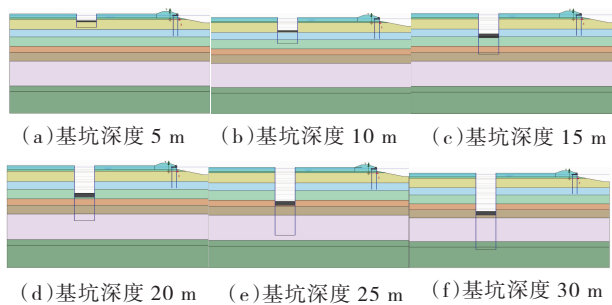


图 13 不同基坑深度有限元模型

本项目建立距离基坑不同距离、不同深度的有限元模型,由于模型数量较大,图仅以距离基坑 55 m 为例,基坑深度为 $5\sim 30\text{ m}$ 的有限元模型。具体结果如图 14 所示。

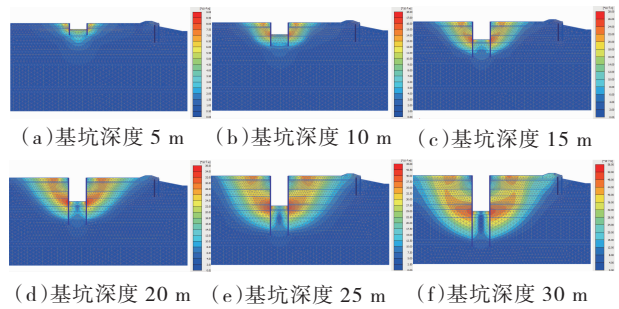


图 14 不同基坑深度总变形云图

根据上述计算结果,可以得出以下结论。

- (1)总变形主要表现为靠近基坑底部变形两侧、基坑附近地表土体变形较大,向四周扩散减小。基坑深度从 5 m 增加至 30 m ,随着基坑深度的增加,总变形的影响越大。
- (2)垂直位移主要表现为靠近基坑地表处垂直位移最大,向四周扩散减小。随着基坑深度的增加,最大垂直位移远离基坑边缘向外扩张,垂直位移最大处大约在 0.5 倍基坑深度的地表处。
- (3)本文将基坑分为不同深度、距离防汛墙不同建立模型,对于本文重点关注堤防位置处的水平位移和堤防沉降结果如下,水平位移如图 15 所示,垂直位移如图 16 所示。

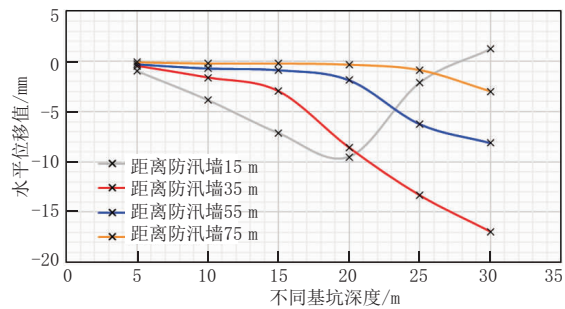


图 15 不同基坑深度引起的水平位移趋势图

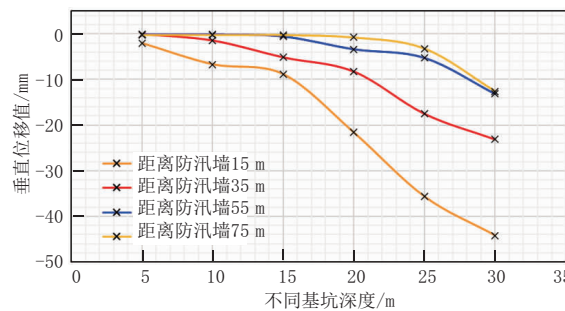


图 16 不同基坑深度引起的垂直位移趋势图

由图 15 可以看出,随着基坑深度的增加,防汛墙的水平位移呈现增大趋势,并且随着距离防汛墙越近,这种增大趋势更加明显。同时可以看出,大部分水平位移为负值,即防汛墙向远离河道方向(基坑方向)倾斜。水平位移大于 10 mm 时,判定为对防汛墙安全具有较大影响,上述结果中部分水平位移已

经超过限值。

由图 16 可以看出,随着基坑深度的增加,防汛墙的垂直位移呈现增大趋势,并且随着距离防汛墙越近,这种增大趋势更加明显。且可以看出,大部分垂直位移为负值,即防汛墙产生沉降。基坑施工造成防汛墙垂直位移不是防汛墙安全影响的主控因素,基坑施工造成的防汛墙水平位移是防汛墙安全影响的主控因素。

3.5 与防汛墙距离不同的影响

基坑距离防汛墙的远近不同会对防汛墙产生不同的影响,因此本小节主要研究基坑与防汛墙距离不同的影响。以基坑宽度为 15 m 为例,针对不同基坑深度、与防汛墙距离不同的影响,建立的模型如图 17 所示。

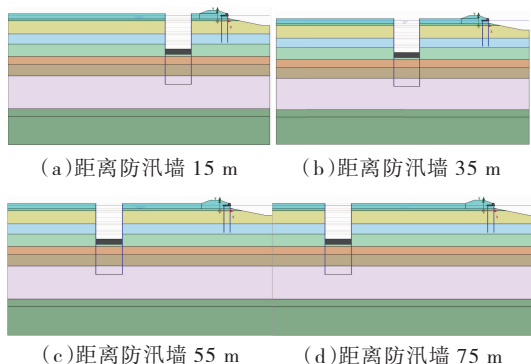


图 17 与防汛墙距离不同的有限元模型图

具体结果如图 18 所示。根据上述计算结果,可以得出以下结论。

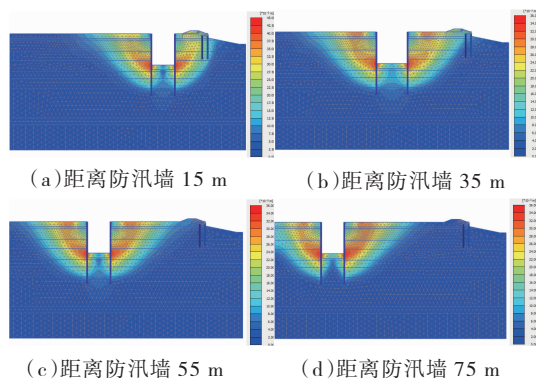


图 18 与防汛墙距离不同总位移变形云图

(1) 基坑两侧影响较为对称,总变形主要表现为靠近基坑底部变形两侧、基坑附近地表土体变形较大,向四周扩散减小;水平变形主要表现为基坑底部处水平位移最大,向周边扩散减小;垂直位移主要表现为靠近基坑地表处垂直位移最大,向四周扩散减小。

(2) 本文将基坑分为不同深度、距离防汛墙不同建立模型,对于本文重点关注堤防位置处的水平位移和堤防沉降结果如下,水平位移如图 19 所示,垂直位

移如图 20 所示。

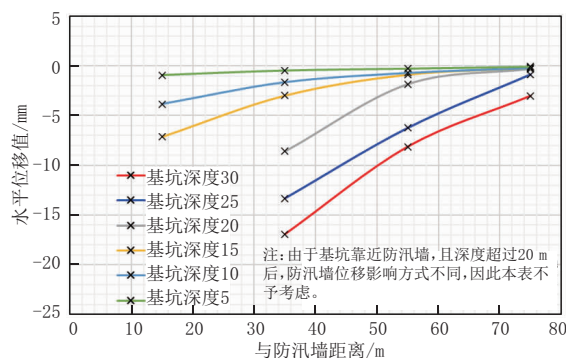


图 19 与防汛墙距离不同水平位移趋势图

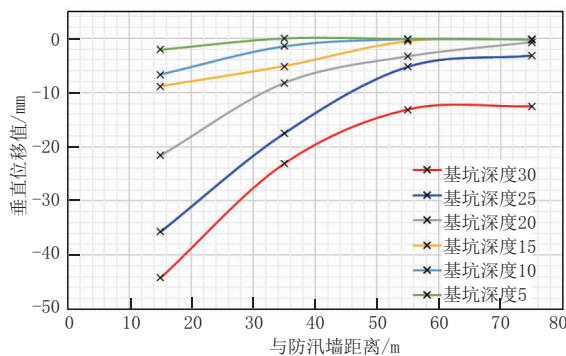


图 20 与防汛墙距离不同垂直位移趋势图

由图 19 可以看出,距离防汛墙越近,防汛墙的水平位移呈现增大趋势,并且随着基坑深度的增加,这种增大趋势更加明显。同时可以看出,大部分水平位移为负值,即防汛墙向远离河道方向(基坑方向)倾斜。水平位移大于 10 mm 时,判定为对防汛墙安全具有较大影响,上述结果中部分水平位移已经超过限值。

由图 20 可以看出,距离防汛墙越近,防汛墙的垂直位移呈现增大趋势,并且随着基坑深度的增加,这种增大趋势更加明显。且可以看出,大部分垂直位移为负值,即防汛墙产生沉降。上述结果均未超过防汛墙沉降限值。

4 结 语

本文以变形控制为指标,研究分析变形控制指标下的基坑开挖过程对防汛墙的影响。通过回归分析等数据分析方法总结结果规律,最终形成基坑施工对防汛墙影响规律,提出主要敏感参数控制指标,通过研究发现基坑的深度、与防汛墙距离不同是最主要的影响因素。根据黄浦江,苏州河分段进行了数据分析,得出以下结论:基坑深度为 15 m 以下,只要保证在防汛墙保护范围之外,同时满足基坑规范相关要求,对防汛墙安全影响较小;基坑深度为 20 m 时,基坑工程距离 33.10 m 以外对防汛墙安全影响

(下转第 259 页)

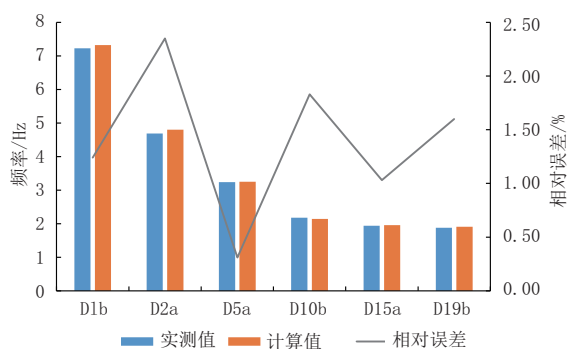


图 5 各吊索频率分析

相对误差仍较小,可忽略不计。结果分析表明利用本文方法能准确地计算实桥吊索模态频率,可应用于实际桥梁吊索的计算。在实际桥梁工程中,依据本文的方法对实际桥梁吊索进行模态频率的计算,不仅可以节省大量的成本,还能为实桥运营期的监测提供较为准确的新思路。

4 结 语

实际工程中,吊索的不同参数对其动力特性的影响不同,本文发展了一套适用于实际不同参数下吊索体系的动力特性分析方法,并通过 W-W 算法进行精确的频率方程求解。本文通过简支吊索的精确解析解和各有限元方法的求解验证了本文方法的准确性,为进一步促进吊索动力特性研究提供了理论分析依据。最后,本文以明州大桥为例,准确的实现了实际桥梁吊索的求解,为实桥运营期的监测提供了新思路。

目前,针对吊索系统,尚无法以解析或半解析的形式全面地考虑抗弯刚度、边界条件等因素的具体影响,因此亟待更全面的分析各因素对吊索动力特性的综合影响。

参考文献:

[1] Fang, C.J., P. Tan, C.M. Chang, *et al*, A general solution for perfor-

mance evaluation of a tall building with multiple damped and undamped outriggers[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2015, 24(12): 797-820.

[2] Fei, H., Danhui, D., Wei, C. et al. A novel analysis method for damping characteristic of a type of double-beam systems with viscoelastic layer[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, (80): 911-928.

[3] Triantafyllou, M. S., Grinfogel, L. Natural frequencies and modes of inclined cables[J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112(1): 139-148.

[4] Caracoglia, L., Jones, N. P. In-plane dynamic behavior of cable networks. Part 2: prototype prediction and validation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279(3-5): 993-1014.

[5] Ozdemir, H. A finite element approach for cable problems [J]. International Journal of Solids and Structures, 1979, 15(5): 427-437.

[6] Tabatabai, H., Mehrabi, A. B. Vibration suppression measures for stay cables[C]//Proceeding of 17th International Modal Analysis Conference. Society for Experimental Mechanics, 1999(2): 1237-1243.

[7] Dan, D. Research on the characteristics of transverse dynamic stiffness of an inclined shallow cable [J]. Journal of Vibration & Control, 2014, 22(3): 1609-1610.

[8] 徐霞飞.考虑边界条件影响的吊索索力估算与试验[D].长沙:中南大学, 2008.

[9] Irvine, H. M. Cable Structures (Structural Mechanics)[M]. MIT press, 1981.

[10] Banerjee, J.R. Dynamic stiffness formulation for structural elements: a general approach[J]. Computers & Structures, 1997, 63(1): 101-103.

[11] Williams, F. W. W. H. Wittrick. An automatic computational procedure for calculating natural frequencies of skeletal structures[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1970, 12(9): 781-791.

[12] Wittrick, W.H. F.W. Williams, A general algorithm for computer natural frequencies of elastic structures[J]. Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics, 1971, 24(3): 263-284.

[13] Xing J Z, Wang Y G. Free vibrations of a beam with elastic end restraints subject to a constant axial load[J]. Archive of Applied Mechanics, 2013, 83(2): 241-252.

(上接第 238 页)

较小;基坑和深度为 30 m 时,基坑工程距离 56.87 m 以外对防汛墙安全影响较小。本文为黄浦江、苏州河沿线防汛墙安全运行管理和保护提供理论依据。

参考文献:

[1] 肖敏.深浅基坑设计分析[J].城市道桥与防洪, 2022(3): 256-259.

[2] 牟晓伟.沟槽基坑上穿城市地道的影响分析[J].城市道桥与防洪, 2022(10): 121-123, 18.

[3] 陈璟斌.不同深基坑开挖条件对邻近桩基受力性能影响研究[D].广州:广州大学, 2019.

[4] 王烨晟,陈文华.基于地墙缺陷的深基坑渗透破坏评判准则研究[J].地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊 2): 951-958.

[5] 付红梅,张岩岩.深基坑空间效应研究综述[J].土工基础, 2019, 33(4): 465-470.

[6] 杨新强,王汉超.深基坑开挖围护结构及邻近管线变形风险研究[J].施工技术, 2018, 47(19): 70-74.

[7] 姜峰.基坑开挖引起邻近管线变形的理论解析[J].地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 362-368.