

# 近海潮汐作用下深大基坑围护结构力学响应规律分析

汪波<sup>1</sup>, 高筠涵<sup>1</sup>, 马龙祥<sup>1</sup>, 王文昊<sup>1</sup>, 姬繁<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 中铁南方投资集团有限公司, 广东 深圳 518052)

**摘要:** 为更好探明潮汐环境下近海基坑围护结构力学响应问题, 提出了以实测墙边地下水位数据为基础的模型边界潮汐地下水位振幅反演分析方法, 分析了不同振幅潮汐作用下地下水渗流衰减规律, 并进一步研究了不同振幅潮汐地下水作用下基坑围护结构的力学响应规律及响应机理。研究表明: 基于地下水渗流衰减规律的潮汐地下水位振幅反演分析方法不用对实际近海区域地质构造信息进行详细考虑, 即可得到包含基坑的小范围区域分析所需的边界地下水位, 在近海工程潮汐影响分析中具有良好的应用价值; 靠海侧地连墙与强透水层直接接触区域以及坑中坑钻孔灌注桩更多受余弦型潮汐作用, 两者水平侧移摆动随时间呈“类正弦型”变化规律, 而靠海侧地连墙其他区域和背海侧地连墙由于自身协同变形和受其他地层不同相位孔压的作用, 呈前后不对称的“不规则槽型”变化规律; 潮汐作用下, 背海侧围护墙体侧移振幅沿深度增大逐渐降低, 但靠海侧围护墙体侧移振幅、弯矩增量分布以及内撑轴力与地层透水性密切相关, 特别在进行受较大潮汐影响工程的结构设计时, 应尽量避免静力工况最大侧移位置和弯矩峰值位置与强透水层位置重合。

**关键词:** 基坑; 围护结构; 潮汐; 非稳定渗流; 力学响应

**中图分类号:** TU43

**文献标志码:** A

## Mechanical Response of Deep Foundation Pit Retaining Structure Under Offshore Tide

WANG Bo<sup>1</sup>, GAO Junhan<sup>1</sup>, MA Longxiang<sup>1</sup>, WANG Wenhao<sup>1</sup>, JI Fan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. China Railway South Investment Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** To explore the influence of offshore tide on the mechanical response of the retaining structure of

foundation pit, the dynamic water level boundary input method is adopted to analyze the attenuation law of groundwater seepage under the action of tides at different amplitudes. Based on the measured groundwater level data near the retaining structure, the inversion method for tidal groundwater level amplitude at the numerical model boundary is established, and the mechanical response of the retaining structure of foundation pit under the action of tidal groundwater at different amplitudes are then studied. This study indicates that with the help of the inversion method for tidal groundwater level amplitude based on the attenuation law of groundwater seepage, the boundary groundwater level required for the small-scale regional numerical analysis of the foundation pit can be obtained without considering the geological information of the actual offshore area in detail, which has a good application value in the analysis of the tidal effect on offshore engineering. The direct contact area between the sea-side retaining structure and the strong permeable layer and the drilled grouting pile in the pit-in-pit are more affected by the cosine tidal waves, with the horizontal lateral swing of these two parts showing a ‘sinusoidal-cosine similarly’ change rule with time. However, due to the self-collaborative deformation and the effect of pore pressure loads with different phases in other strata, the lateral time-history curves of the back-sea side retaining structure and the other regions of the seaside retaining structure show an asymmetric ‘irregular groove’ change rule. Under the action of tide, the lateral displacement amplitude of the retaining wall at the back of the sea gradually decreases with the increase of depth, but the lateral displacement amplitude, the bending moment increment distribution and the internal bracing axial force of the retaining wall at the sea side are closely related to

收稿日期: 2023-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2034205)

第一作者: 汪波(1975—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为隧道与地下工程。E-mail: ahbowang@163.com

通信作者: 马龙祥(1988—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为隧道与地下工程。

E-mail: malongxiang\_swjtu@163.com



论文  
拓展  
介绍

the permeability of the stratum. Especially in the structural design of the project affected by large tide, the maximum lateral displacement position and bending moment peak position of the static working condition should be avoided to coincide with the position of the strong permeable layer as far as possible.

**Key words:** foundation pit; retaining structure; tide; unsteady seepage; mechanical response

近年来,随着填海造陆工程的兴建,近海深大基坑工程数量也逐年增多,不同于传统富水环境中的深基坑工程,近海深大基坑工程不仅会面临高地下水位、强水力补给问题,受潮汐效应影响,场地地下水位还可能存在滞后于潮汐的周期性波动现象,致使近海基坑渗流场表现为非稳态特点,从而造成基坑周围地层有效应力和超静孔压时刻改变,给基坑围护结构和周围地层的稳定性带来不利影响。

在非稳态渗流边界条件基坑问题中,应宏伟及其团队成员针对潮汐影响下基坑抗渗防突涌问题展开了较为丰富的研究<sup>[1-3]</sup>,如分析非 Darcy 参数等因数对弱透水层超孔压变化规律的影响;基于越流理论和土体压缩非线性和渗流非线性情况,研究开挖面处出逸比降影响情况等。而在基坑围护结构力学响应问题中,国内外相关研究主要还是基于固定渗流边界条件,并针对不同地质条件,基坑支护型式、开挖方法及流程进行<sup>[4-6]</sup>,关于潮汐环境下的基坑围护结构力学响应方面的研究还相对较少。陈从睿<sup>[7]</sup>将潮汐荷载考虑为动态水位边界施加于模型海岸斜面边界,研究了围堰在潮汐作用下的响应规律;寇强<sup>[8]</sup>将潮汐分解为 4 种水位情况施加于模型内部并依次求解,研究了基坑支护结构的在潮汐变化过程中的响应情况。

而现有的模拟方法普遍存在地质制约条件过多、计算连续性不足、对潮汐水流在地层中的衰减考虑不全面等问题,不能完全反映潮汐作用下相应结构的响应问题,因此,在工程中的实际运用也较为困难。在此背景下,本文以深圳市滨海大道(总部基地段)交通综合改造项目深基坑工程为依托,采用流固耦合方法,将潮汐考虑为随时间波动的动态边界,研究了潮汐地下水在地层中的渗流衰减规律,建立以实测墙边地下水位数据为基准的潮汐边界振幅反演分析方法,并将反演得到的渗流边界代入基坑数值模型,从而最终探明了潮汐作用下基坑围护结构的力学响应规律及作用机理。

## 1 地层潮汐衰减反演方法的提出

### 1.1 既有方法概述及反演思路

潮汐对近海工程的荷载作用可分为两类,①是潮水压力荷载,②是潮汐引发的地下水位升降荷载。潮水压力荷载为工程结构直接受到水压作用(图 1),如围堰,桥墩,海滩坡度较陡区域的近海基坑等易受此类荷载影响。而地下水位升降荷载则是由海水在地层中的渗流引起(图 2),当近海基坑周围存在与海洋联通的透水层时,该荷载会对围护结构产生不利影响。

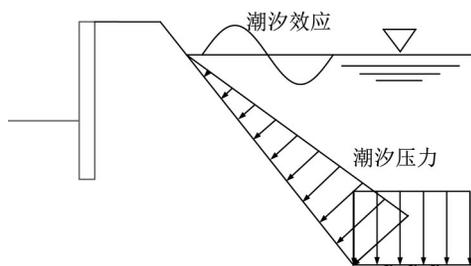


图 1 潮汐压力荷载

Fig. 1 Load of tidal pressure

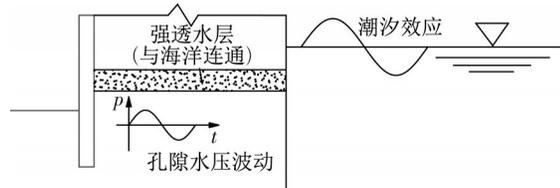


图 2 潮汐引发的地下水位升降荷载

Fig. 2 Tide-induced rise and fall load of groundwater level

针对上述潮汐荷载模拟上,现有文献主要采用方法有二,较早的方法可称为静态简化,即结合潮汐水位升降缓慢特点,将潮汐变化过程近似考虑并分解为多个典型静载工况进行求解<sup>[8]</sup>。而近几年随着数值仿真技术的日益成熟,学界开始考虑将海洋潮汐变化作为模型的动态渗流边界条件,并采用流固耦合方法对其进行连续化求解<sup>[7,9-10]</sup>。虽然现有基于流固耦合理论的众多研究已在潮汐环境下基坑结构的响应问题上取得诸多成果,但既有方法往往直接采用海洋潮差数据设置模型动态水位边界,需将靠海岸侧甚至部分海底滩涂下方地层信息全部纳入考虑,才能保证潮汐输入的准确。显然,这样的方法对于距海岸线一定距离的工程不太适用,因为此种情况下工程海岸侧地质准确勘探所需的工作量将十分巨大,而如若不能准确探明海岸侧较大范围内的地

质情况,该方法的准确性又会受到极大影响。

与基坑围护结构静力响应类似,对于距海岸一定距离仅受地下水升降荷载影响的基坑工程,潮汐作用下围护结构力学响应仅与墙边较近距离范围内的土体分布和水位变化情况紧密相关,只要保证基坑周边地质情况及地下水位变化情况的准确模拟,就能保证潮汐作用下基坑围护结构响应的准确模拟。因此,可以实测墙边地下水位数据为基础,通过潮汐地下水渗流衰减规律反演分析的方法,在包含基坑的小范围分析区域内对地下水位动态条件进行较为准确模拟。该方法的基本思想为:通过地连墙周边水位观测孔获得大量实测数据后,将分析模型按坑周地质信息进行水平简化并延伸建模后,按经验预设多组边界条件试算工况对模型的地层潮汐衰减规律进行分析拟合,而后再以围护结构边的实测地下水位数据作为评判标准反演数值分析时模型边界应当输入的动态水位振幅大小,即可较为准确地进行潮汐作用下围护结构力学响应的计算分析。

### 1.2 反演流程

本文分析案例不涉及基坑开挖,在固定渗流边

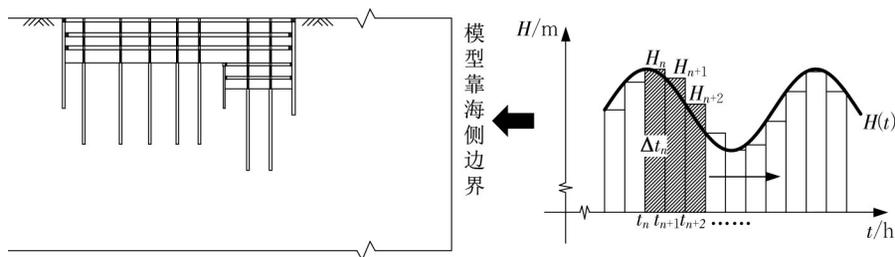


图3 潮汐水位函数模拟方法示意

Fig. 3 Simulation method of tidal water level function

## 2 工程概况及场地地下水变化规律

### 2.1 工程概况

滨海大道(总部基地段)交通综合改造项目位于深圳市南山区、福田区规划超级总部片区及附近,由现状滨海大道(总部基地段)进行下沉扩容改造,下沉改造段西起深湾一路,东至深湾五路,总长约1.5 km(图4),其中主线隧道暗埋段长约1 057 m,两侧分设268 m及235 m敞开段;南、北两侧辅线隧道暗埋段各长1 270 m和1 137 m,两侧敞开段长度约140~188 m,敞开段为U型槽结构,暗埋段为“L”型箱式结构,主线、北辅道位于地下一层主坑,平均开挖深度13.7 m,南辅道位于地下二层坑中坑,平均开挖深度20.7 m,基坑大部分区域开挖宽度69~72 m,基坑暗埋段典型断面图、地层位

界环境下完成基坑降水开挖后,引入动态渗流边界进行计算。在潮汐动态水位边界的处理上,结合潮汐时变特征可近似用三角函数描述的特点,首先将反演和后续结构响应计算中的动态水位边界简化为周期12 h的余弦函数如式(1)所示,并借鉴“微积分”的思想对函数进行“离散化”处理,如图3所示。

$$h = A [\cos(\pi t / 21600) - 1] - H \quad (1)$$

式中: $h$ 为模型边界处 $t$ 时刻潮汐水位,m; $A$ 为边界潮汐振幅,m; $t$ 为计算时间,s; $H$ 为场地最高水位,m。

在进行反演中,先拟定几组边界潮汐振幅 $A$ 工况施加于靠海侧边界进行试算,提取分析围护结构旁各地层中间厚度处孔压测点振幅响应情况,并与模型边界输入水位振幅拟合出关系函数曲线,随后将实测的墙边地下水位振幅代入函数中,求得能够让墙边模拟水位振幅与实测水位振幅取得一致的数值计算中需要的边界潮汐振幅,并以此潮汐边界振幅开展相应力学响应分析。显然,如此即可在包含基坑的小范围分析区域内对地下水位动态条件进行较为准确模拟,从而保证潮汐环境下基坑围护结构响应分析的可靠性。

置关系图如图5及图6所示。基坑北靠超级总部,南侧毗邻深圳湾海域,与海洋最近直线距离仅55 m,基坑中下部深度存在与海洋连通的强透水④<sub>2</sub>含粘性土砾砂层,地勘资料表明,场地历史最高地下水位为-2.4 m,且基坑与海洋潮汐水力联系强烈。

### 2.2 场地地下水位变化规律分析

#### 2.2.1 观测孔位置选取及布设

基坑平行于海岸线由西向东呈长条状布置,故分别于基坑西、中、东段三处区域靠海侧地连墙外2 m布设地下水位观测孔,进行自动化监测,由西向东分别为DSW-1~DSW-3,满朝时刻距海岸线距离约54~58 m,观测孔位置及时间信息如图7、表1所示。由于现场施工组织因素,各观测孔未在同一观测时间段内统一观测,但各孔观测时间足够囊括一

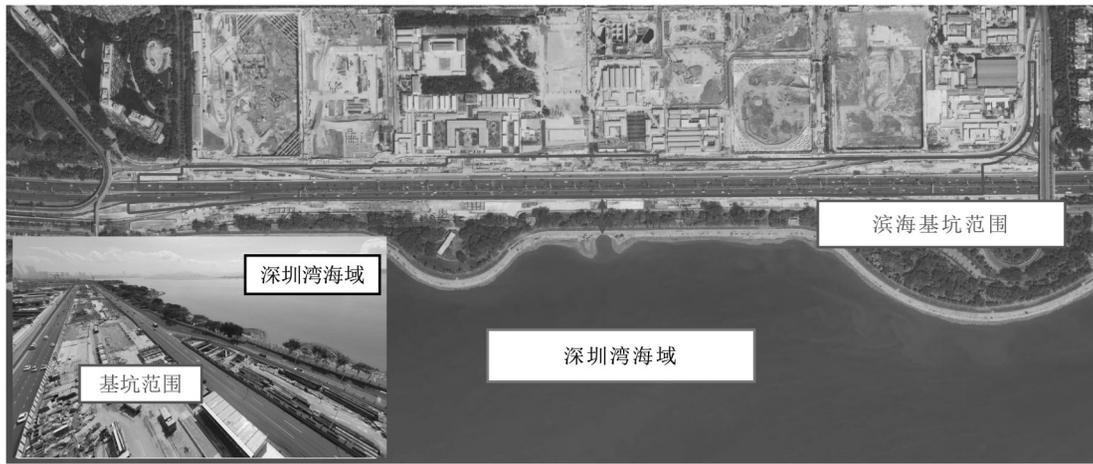


图4 滨海大道(总部基地段)下沉隧道卫星与实景图

Fig. 4 Satellite and real map of sinking tunnel on Binhai Avenue ( Headquarters base section )

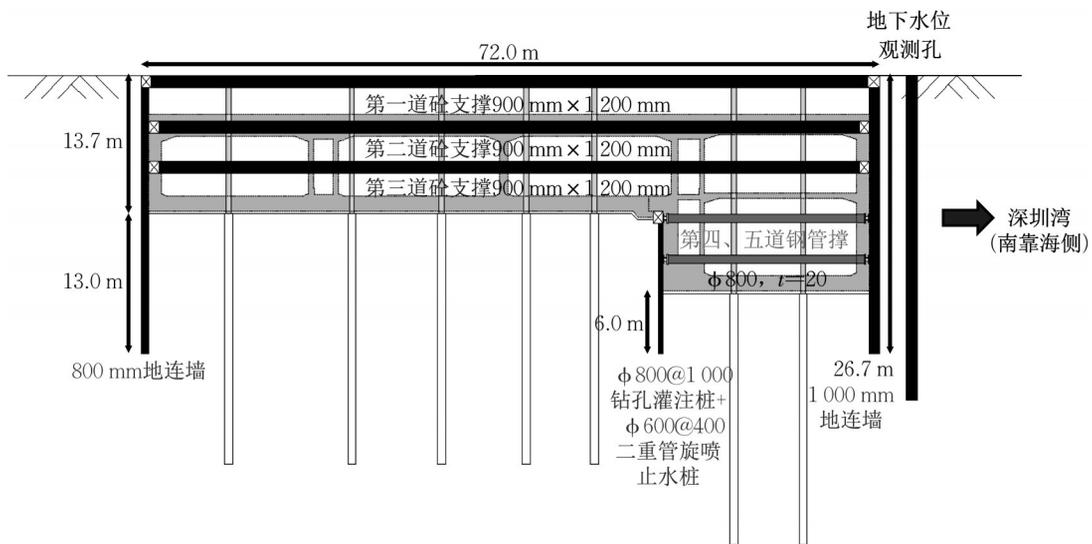


图5 基坑暗埋段典型断面示意图

Fig. 5 Typical section of buried section of foundation pit

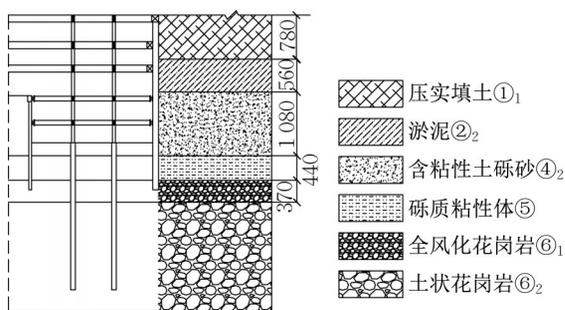


图6 地层与基坑位置关系图

Fig. 6 Relationship between stratum and foundation pit position

个潮汐周期(14.8日)。

### 2.2.2 地下水位对比分析

图8为三观测孔地下水位数据曲线图,可以看到,



图7 地下水位观测孔信息图

Fig. 7 Information map of underground water level observation holes

表1 观测孔时间信息

Tab.1 Time information of observation holes

观测孔	观测时间段	观测天数
DSW-1	2020/10/15~2020/11/24	41
DSW-2	2020/11/04~2020/11/25	21
DSW-3	2021/05/15~2021/08/30	108

三个观测点地下水位变化曲线呈现不同规律。其中DSW-1地下水位明显受潮汐影响,约24 h内波动1~2次,同天两次涨落规律持续时间约11~12 d,同天单次涨落规律持续时间约3~4 d,合计时间约为15 d,与深圳当地大小潮期时间(14.8日)基本相同,变化规律与潮汐基本一致。其最高值出现在11月19日下午2:

30,为-5.03 m,最小值出现在11月7日中午12:30,为-5.82 m,水位差0.79 m,平均水位-5.376 m。DSW-2、3规律相似,地下水位基本无波动现象,地下水位均出现阶梯状上升再缓慢下降特点,符合一般环境下降雨引发地下水位抬升特点,调查深圳历史气象记录发现降雨后1~3 d内地下水位会滞后抬升。

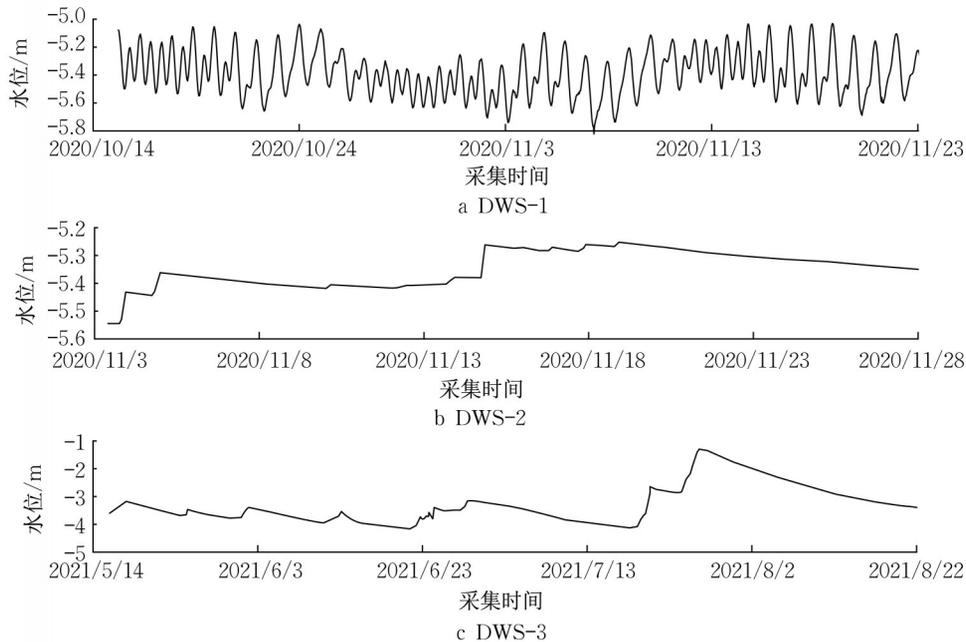


图8 靠海侧观测孔地下水位数据实测曲线

Fig. 8 Measured curve of groundwater level data from seaside observation hole

### 2.3 地下水位差异成因分析及计算振幅确定

三观测孔位置与海岸线距离并无明显区别,但是各孔数据规律却存在较大差异。而解读基坑南辅道地质剖面图(图9)即可发现场地东西两侧地质构成差异显著,具有强透水性质的含粘性土砾砂④<sub>2</sub>层广泛分布于基坑西段,而当观测位置向东移动,本应处于下层的砾质粘性土⑤层开始逐渐向上侵占④<sub>2</sub>层区域,使东段④<sub>2</sub>层几近消失,而潮差势能增量则在⑤层的阻隔下被迅速耗散,从而无法有效影响基坑中、东段靠海侧地下水。故对于近海基坑,特别与滨海大道相似的长条形基坑,场地地下水不一定会受到潮汐效应影响,应结合地质资料和现场观测数据进行判断。

而滨海基坑总长近1.5 km,且截面形式比较单一,在已探明基坑中、东段基本不受潮汐影响后,进行全长范围内的基坑建模会耗费大量时间且无意义,故本文研究范围仅为基坑西段ZN(S)K1+485~ZN(S)K1+698里程范围。并按西侧地下水位最大差值0.79 m取整设置墙边地下水位差0.4 m为

围护结构力学响应分析工况,模型最高水位则按最不利取为历史最高地下水位-2.4 m。

## 3 数值模型、潮汐渗流规律反演分析

### 3.1 数值模型及分析工况

由于滨海基坑形状狭长,截面特征变化不大,选取长度为24 m的部分区段,采用FLAC3D有限差分软件依据实际结构型式进行建模分析,如图10所示。模型尺寸选取为320 m×24 m×90 m,基坑宽72 m,考虑边界效应和计算时间,靠海侧地连墙距动水位边界124 m,计算网格随距基坑距离的增加,尺寸逐渐加大<sup>[10]</sup>。基坑共涉及围护结构3道,分别为wall1(背海侧地连墙),厚0.8 m;wall2(靠海侧地连墙),厚1.0 m;wall3(坑中坑灌注桩加旋喷止水),按刚度等效公式换算为0.48 m厚地连墙<sup>[11-12]</sup>。

$$\frac{(D+s)\omega^3}{12} = \frac{\pi D^4}{64} \quad (2)$$

式中: $D$ 为钻孔灌注桩直径; $s$ 为桩的净间距; $\omega$ 为地

下连续墙的折算厚度。

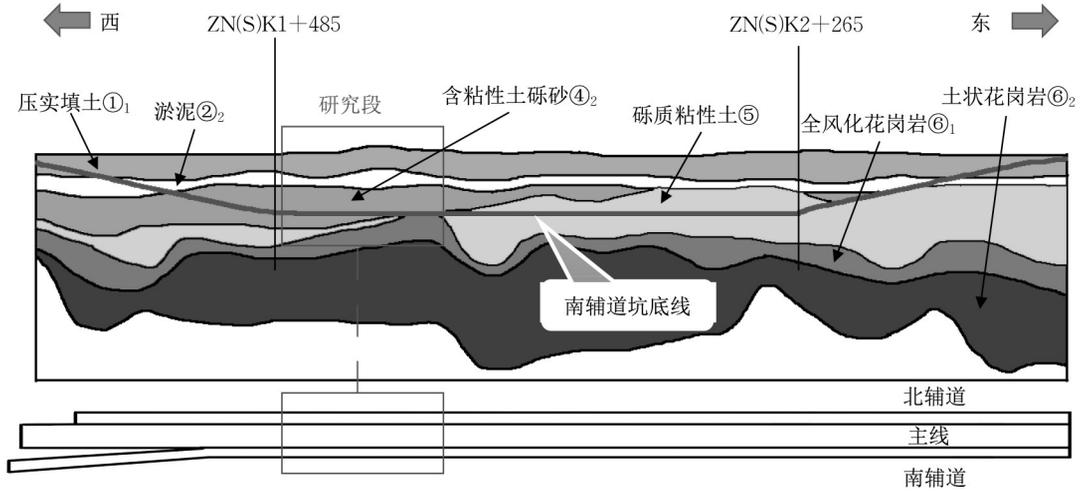


图9 南辅道坑底线纵断面与基坑平面位置关系图

Fig. 9 Relationship between vertical section and plane position of pit bottom line of south auxiliary road of foundation pit

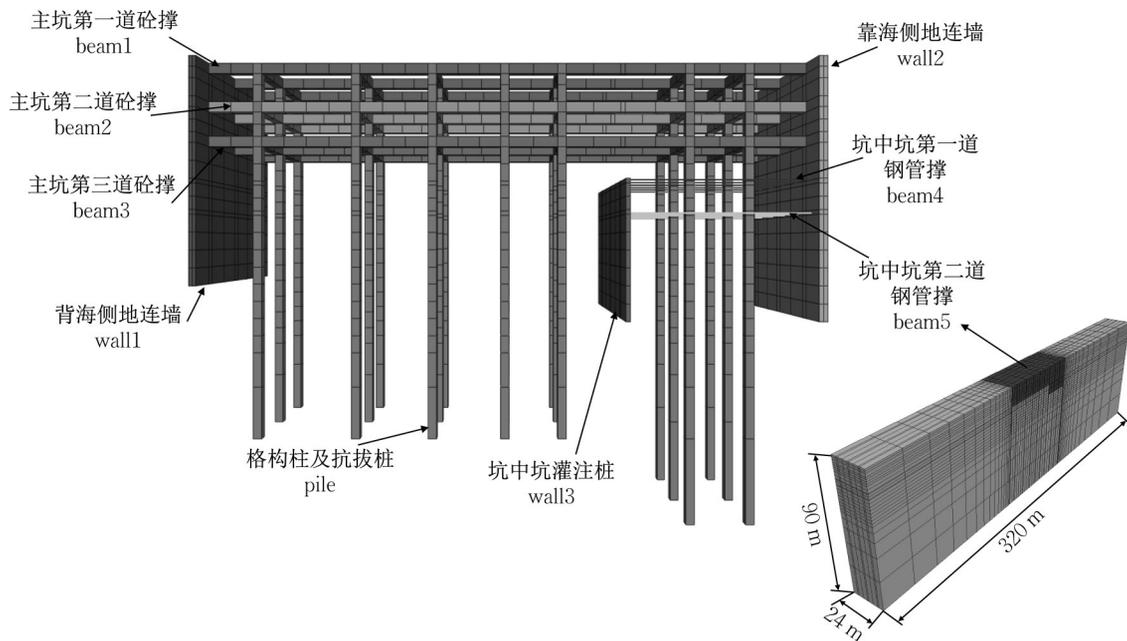


图10 计算模型示意图

Fig. 10 Calculation model

基坑涉及横撑结构5道,分别为主坑砼撑1~3,坑中坑钢管撑4~5。模型土体服从Mohr—Coulomb屈服准则,地连墙、砼撑、格构柱以及立柱桩均采用弹性实体单元模拟,钢管撑采用beam单元模拟。力学边界条件为水平位移和底部竖向位移约束,模型的水力边界条件按靠海侧边界透水、其余边界不透水进行设置,降水井采用“以线代井法”模拟<sup>[13]</sup>。模型涉及相关材料的物理力学参数见表2。

试算反演工况为:动态水位边界振幅2.0 m、

2.5 m、3.0 m、3.5 m和4.0 m,欲得到的力学响应分析工况为:墙边水位振幅0.4 m。

### 3.2 墙边各地层孔压状况分析

以靠海侧地连墙边强透水层(含粘性土砾砂层)中间厚度处孔压取得峰值时刻为起点,绘制各反演工况下靠海侧地连墙边各地层中间厚度处的孔压时程曲线如图11所示。可以看到:受潮汐效应影响的土层主要有含粘性土砾砂层和与之上下相邻的淤泥和砾质粘性土层,其中强透水层孔压波动现象最明

表 2 涉及材料物理力学参数表  
Tab. 2 Physical and mechanical parameters of materials

地层名称	密度 $\rho$ / (kg·m <sup>-3</sup> )	变形/弹性模量 $E$ / MPa	黏聚力 $c$ / kPa	内摩擦角 $\varphi$ / (°)	泊松比 $\nu$	垂直渗透系数 $K_v$ / (cm·s <sup>-2</sup> )	水平渗透系数 $K_h$ / (cm·s <sup>-2</sup> )	孔隙比 $e$
压实填土	1 880	15	14	18	0.26	$8.45 \times 10^{-5}$	$5.95 \times 10^{-5}$	0.718
淤泥	1 708	3.5	3.62	18.42	0.40	$6.33 \times 10^{-7}$	$5.08 \times 10^{-7}$	1.390
含黏性土砾砂	1 948	30	4.88	30.56	0.29	$6.18 \times 10^{-2}$	$4.49 \times 10^{-2}$	0.591
砾质黏性土	1 856	25	23.82	25.36	0.30	$6.00 \times 10^5$	$5.71 \times 10^{-5}$	0.954
全风化花岗岩	1 895	65	4.18	30.98	0.29	$6.26 \times 10^5$	$1.25 \times 10^{-4}$	0.806
土状花岗岩	1 900	160	40	32	0.28	$1.25 \times 10^{-4}$	$1.63 \times 10^{-4}$	0.693
钢筋混凝土	2 500	31 500			0.30			
钢管撑	7 800	200 000			0.20			

显,相邻两土层孔压取得峰值时间均滞后于强透水层,而与强透水层相隔的填土和全风化花岗岩层在各工况下均不受边界孔压振幅影响。上述现象表明,基坑周围除强透水层外,潮汐效应在其余地层中

平行传递现象已经基本衰减消失,相邻地层存在的孔压波动现象为强透水层孔压向相邻地层上下传递所致,而上下传递过程中多出的渗流路径正是导致相邻地层孔压波动时间滞后,现象更弱的原因。

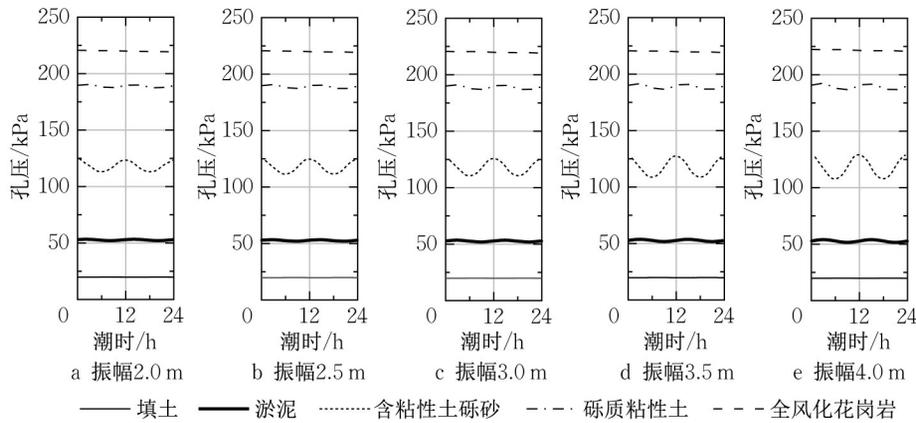


图 11 各孔压边界条件下的墙边地层中间厚度处测点孔压变化曲线

Fig. 11 Variation of pore pressure at the measuring point at the middle thickness of the wall stratum under the boundary conditions of pore pressure

3.3 强透水层孔压分析

由 3.2 节分析可知,在仅含单层强透水层的地质条件下,基坑周边各地层孔压波动主要出现在强透水层,其余地层孔压波动不明显,故可近似以墙边强透水层孔压对观测孔中的水位波动进行反演。

提取各工况下靠海侧强透水含粘性土砾砂层在距计算模型边界不同距离处的孔压振幅,如图 12 所示。可以看到,各工况下振幅均随远离模型边界逐渐降低,且降低速度逐渐减小。进一步提取各工况靠海侧边界至墙边的孔压振幅数据做散点图并进行拟合(图 13)可知,强透水层各点内部孔压振幅与边界孔压振幅均具有强线性关系(决定系数  $R^2$  均趋于 1)。且各曲线均经过原点附近,即靠海侧边界为定水头边界时,强透水层内部孔压不发生波动,符合客观规律。本工程中围护墙边观测孔位于距靠海侧地连墙 2 m 距离处,单独给出此处强透水层内部孔压

振幅与模型边界输入振幅拟合函数关系式如下:

$$y = 0.2648x + 0.0164, R^2 = 1 \quad (3)$$

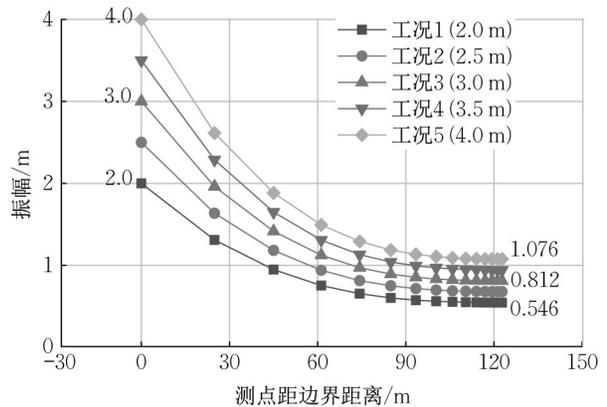


图 12 强透水层孔压振幅与距计算模型边界的关系曲线  
Fig. 12 Relationship between pore pressure amplitude and distance from calculation model boundary of strong permeable layer

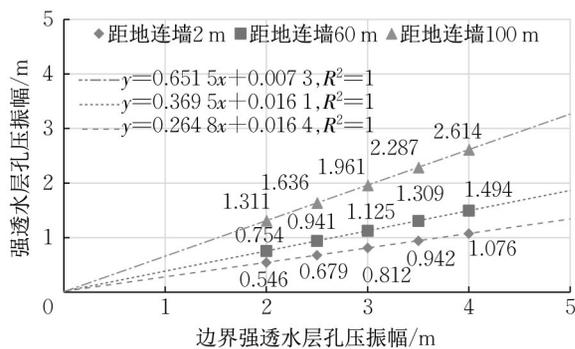


图13 边界至边墙含水层孔压振幅关系曲线

Fig. 13 Relationship of pore pressure amplitude from boundary to sidewall aquifer

故根据式(3)计算得到墙边水位振幅为0.4 m时,边界水位振幅应为1.46 m。为进一步验证设置的边界振幅工况的准确性,将1.46 m边界水位振幅代入计算得到了靠海侧强透水层沿程孔压时程曲面图(图14)。测量其靠海侧地连墙外2 m处强透水层峰谷水位差值为0.8 m,即振幅0.4 m,表明拟合得到的线性函数可靠。故在后续分析中,即以1.46 m作为边界潮汐振幅进行围护结构力学响应分析。

## 4 围护结构力学响应规律分析

### 4.1 围护结构侧移

图15为0.4 m振幅潮汐作用下各围护结构侧移三维时程曲面图,图16为摆动幅度量值与各围护结构深度关系曲线,图17为各围护结构5个等距测点侧移时程曲线(由墙顶至墙底沿深度方向布置5个等距测点)。为便于观察,各时程图均只显示24 h,

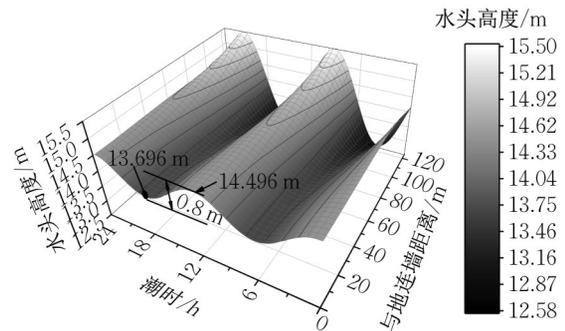


图14 靠海侧强透水层孔压时程曲面图

Fig. 14 Time-history surface diagram of pore pressure near seaside strong permeable layer

即两个潮汐周期内的位移变化情况。通过图15、图16可以明显观察到如下特征:①非靠海侧围护结构受传递的潮汐作用呈类似“悬臂梁受多个同向集中荷载”的模式,故摆幅沿深度逐渐减小;②靠海侧围护结构摆幅最大位置取决于强透水层位置,即图17中不同于非靠海侧围护结构,wall2摆幅曲线先随深度增加逐渐增大,至距地表约15 m取得最大位移差2.03 mm后又逐渐减小,最大值位置位于强透水层内;③各围护结构底部土体对围护结构存在明显约束作用,底部摆幅最小;④同深度下越远离潮汐边界的围护结构振幅会越小;⑤本工程案例中靠海侧墙体最大摆幅点同时临近静力状态下的侧移最大点,因此,在面对较大潮汐影响时,设计施工过程中应注意靠海侧围护结构侧移曲线与强透水层的位置关系,尽量避免侧移最大位置与强透水层位置重合产生叠加,进而造成围护结构最大水平位移进一步增长。

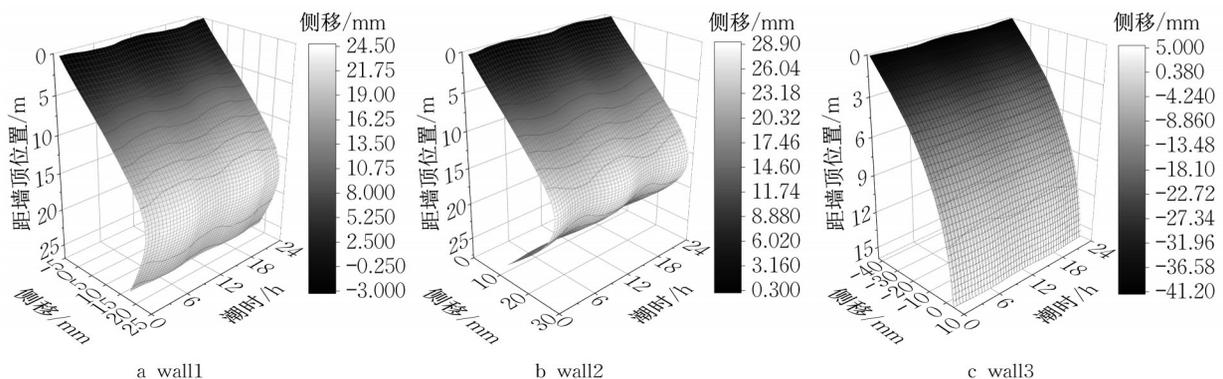


图15 0.4 m振幅潮汐作用下围护结构侧移三维时程曲面图

Fig. 15 3-D time-history curve of lateral displacement of retaining structure at an amplitude tide of 0.4 m

进一步观察图17可知各围护结构的摆动形态是具有差异的,大致可分为“类正余弦型”和“不规则

槽型”两种。“类正余弦型”曲线摆动过程光滑流畅,峰、谷值前后曲线基本对称,如wall2与强透水层同

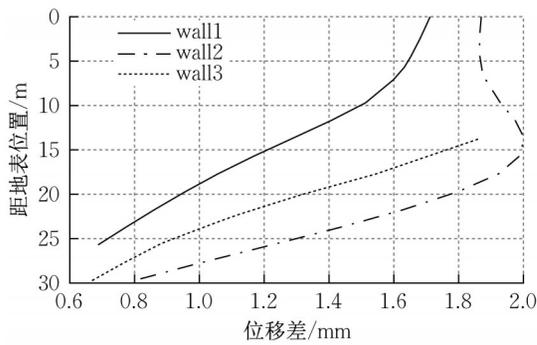


图16 摆动幅度与地连墙深度关系曲线

Fig. 16 Swing amplitude versus depth of diaphragm wall

深度区域和 wall3 全段 (wall2-3、wall2-4 和 wall3-1~wall3-5 测点);“不规则槽型”曲线不流畅,峰谷值前后曲线不对称,该线型出现在 wall1 全段和 wall2 其余部分。这主要究其原因为:wall2 相应区域与主要的孔压荷载增量直接接触,wall3 也由位于该深度的两道钢管撑与 wall2 该区域紧密连接,故其摆动曲线接近潮波正余弦函数,呈“类正余弦型”;呈“不规则槽型”的其他区域则既以协同变形的形式分担了强透水层提供的孔压荷载增量,自身又承受着由密

贴地层传导的相位滞后孔压荷载增量,故对应测点位移曲线在多个相位不同的正余弦荷载叠加作用下呈现出“不规则槽型”的摆动特征。

#### 4.2 地连墙受力

图 18a、18b 分别为各潮时下地连墙 wall1、wall2 的弯矩曲线图和以满潮时刻的潮汐曲线作为基准剥离出的潮汐作用下的地连墙弯矩增量曲线。可以看到,各潮时的地连墙弯矩曲线基本重合,在土压力与潮汐作用的叠合下,图中潮汐对弯矩产生的影响小且不易观察。而在潮汐作用引起地连墙弯矩增量的曲线上则可明显观测到随着潮位下降,两墙均表现为正、负弯矩增量绝对值增大,且随着周期结束,弯矩基本回到初始位置的特点。背海侧 wall1 受影响程度明显小于靠海侧地连墙 wall2, wall2 强透水层深度范围内 14 m 和 17.5 m 深度处存在两处弯矩增量凸起,正好与其负弯矩峰值点位置重叠。14 m 深度处的突起点最大弯矩值为  $505 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ,潮汐引起的最大增量绝对值则为  $40.1 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ,占比 7.9%;17.5 m 深度处的突起点最大弯矩值为  $1060 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ,潮汐引起的最大增量绝对值则为  $43.7 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ,占比 4.1%。

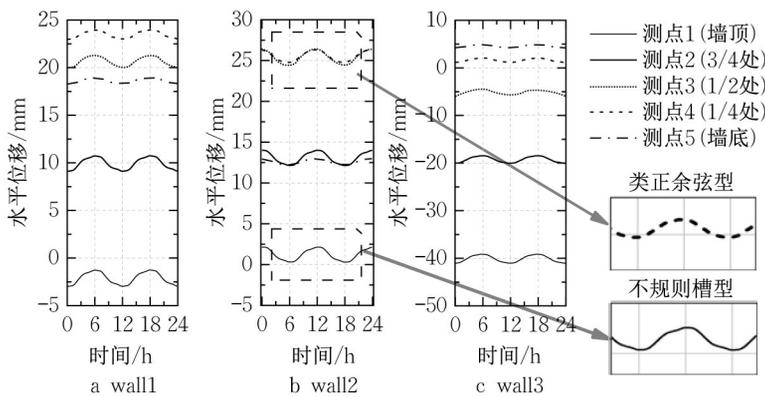


图17 各围护结构5等距测点侧移时程曲线

Fig. 17 Lateral time history curves of 5 equidistances

虽然墙体弯矩曲线线性主要取决于墙背土压力、内撑和坑底土体的共同作用,但上述分析表明,若地连墙弯矩峰值出现在强透水层区域,潮汐作用下的弯矩增量会相较于其他区域更大,其弯矩不利将进一步加剧。

#### 4.3 内撑受力

各道横撑最大轴力随潮汐响应曲线如图 19 所示。各横撑轴力波动范围、波峰和波谷的差值及轴力差与最大轴力比值均在图中以对应线框内数值进行了标注。通过观察发现,处于强透水层深度范围

中的钢管撑轴力波动曲线更加光滑,接近正余弦函数,而范围外的砼撑轴力波动曲线则更加粗糙,其原因与围护结构摆动中呈现出两种线型的原因类似,此处不再赘述。而各横撑轴力波动范围及轴力差数据则表明,同种内撑轴力振幅排序与受力排序无对应关系,与内撑和强透水层的对应位置关系显著。

结合图 20 进行说明,砼撑轴力排序为砼撑 3>砼撑 1>砼撑 2,而砼撑 3、2、1 在竖向位置上逐渐远离强透水层,即轴力振幅排序为砼撑 3>砼撑 2>砼撑 1,钢管撑轴力排序为钢管撑 4>钢管撑 5,而钢管撑 5 相对

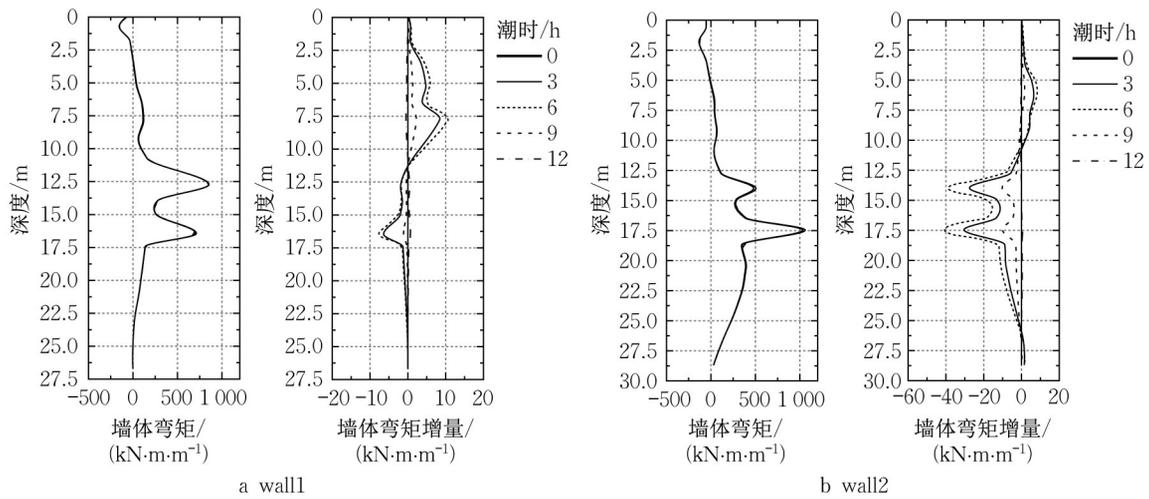


图 18 各潮时围护结构弯矩及弯矩增量曲线图

Fig. 18 Bending moment and bending moment increment of enclosure structure at different tides

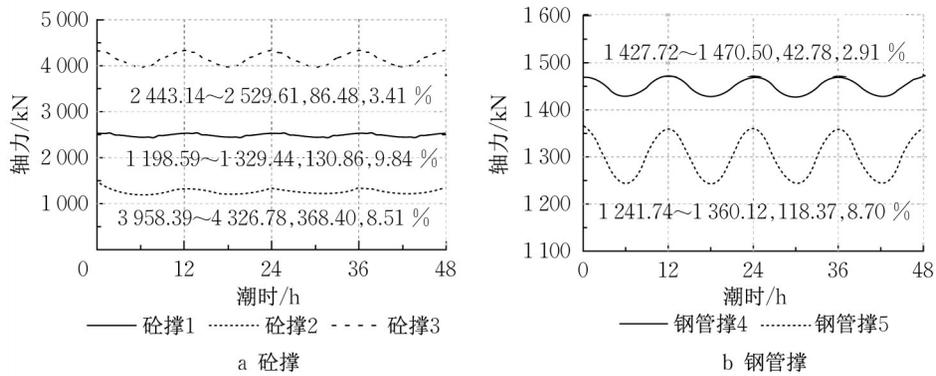


图 19 各撑轴力最大点轴力随时间变化曲线

Fig. 19 Axial force at maximum points versus time

于钢管撑4更靠近强透水层中部,相应轴力振幅排序为钢管撑5>钢管撑4。同时,就本工程而言,各道横撑轴力差与最大轴力比值均在10%以下。

## 5 结论

本文针对近海基坑围护结构在潮汐荷载作用下的力学响应问题,提出了基于地下水渗流衰减规律的潮汐地下水位振幅反演分析方法,并以此为基础,研究了不同振幅潮汐地下水作用下基坑围护结构的力学响应规律及响应机理。通过研究,得到了如下结论:

(1)近海潮汐作用下,地连墙边孔压发生波动的地层主要为强透水层以及相邻弱透水层,且与强透水层相邻弱透水地层中的孔压波动也主要由强透水层孔压波动向上下相邻地层的传递所造成。强透水层内部测点的孔压振幅与边界孔压呈强线性相关关系,以实测墙边孔压为基础,通过反演分析,可得到包含基坑的小范围数值分析区域所需的合理边界地下水位条件。

(2)靠海侧地连墙与强透水层直接接触区域以及坑中坑钻孔灌注桩更多受余弦型潮波作用,两者水平侧移摆动随时间呈“类正余弦型”变化规律,而靠海侧

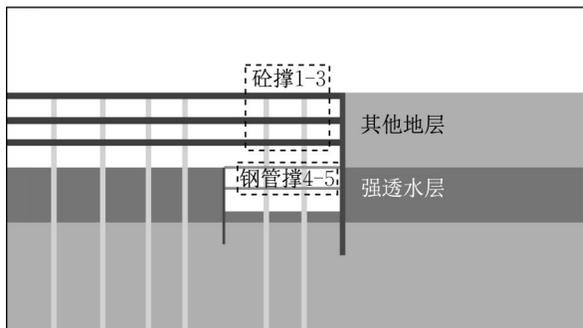


图 20 内撑与强透水层关系示意图

Fig. 20 Relationship between internal bracing and strong permeable layer

地连墙其他区域和背海侧地连墙由于自身协同变形和受其他地层不同相位孔压荷载作用,其侧移时程曲线则呈现出前后不对称的“不规则槽型”变化规律。

(3)潮汐作用下,背海侧围护墙体侧移振幅沿深度增大逐渐降低,但靠海侧围护墙体侧移振幅、弯矩增量分布以及内撑轴力与地层透水性密切相关,表现为:与强透水层接触区域围护墙体侧移振幅更大;墙体静力弯矩峰值位于强透水层区域内时,潮汐作用引起弯矩增量相较于其他区域更大;同型内撑轴力振幅随竖向位置远离强透水层逐渐减小,因此,在进行受较大潮汐影响工程结构设计时,应尽量避免静力工况最大侧移位置和弯矩峰值位置与强透水层位置重合。

#### 作者贡献声明:

汪波:提出概念,方法设计,指导数值建模分析。

高筠涵:论文撰写,方法设计,数值建模分析。

马龙祥:指导论文撰写,修改论文框架,指导数值建模及分析。

王文昊:绘制部分图片,论文修改。

姬繁:绘制图片,现场配合。

#### 参考文献:

- [1] 应宏伟,章丽莎,谢康和,等.坑外地下水位波动引起的基坑水土压力响应[J].浙江大学学报(工学版),2014,48(3):492.  
YING Hongwei, ZHANG Lisha, XIE Kanghe, *et al.* Pore and earth pressure response to groundwater fluctuation out of foundation pit [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014,48(3):492.
- [2] 应宏伟,王迪,许鼎业,等.动态承压水作用下考虑土体非线性的基坑弱透水层出逸比降研究[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(12):2356.  
YING Hongwei, WANG Di, XU Dingye, *et al.* Analysis on exit gradient of aquitard at bottom of foundation pit under dynamic confined water considering nonlinearity of soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(12):2356.
- [3] 应宏伟,许鼎业,王迪,等.波动承压水下基坑底部弱透水层的非Darcy渗流分析[J].上海交通大学学报,2020,54(12):1300.  
YING Hongwei, XU Dingye, WANG Di, *et al.* Analysis of non-darcy flow in aquitard at bottom of foundation pit under fluctuation of confined water [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020,54(12):1300.
- [4] 郑刚,曾超峰.基坑开挖前潜水降水引起的地下连续墙侧移研究[J].岩土工程学报,2013,35(12):2153.  
ZHENG Gang, ZENG Chaofeng. Lateral displacement of diaphragm wall by dewatering of phreatic water before excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(12):2153.
- [5] BERESLAVSKII E N. The flow of ground waters around a Zhukovskii sheet pile [J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2011,75(2):210.
- [6] 孙晓贺,施成华,曹成勇,等.强透水地层水平帷幕作用下基坑渗流特性[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(6):1002.  
SUN Xiaohu, SHI Chenghua, CAO Chengyong, *et al.* Seepage characteristics of foundation pit with horizontal curtain in strong permeable stratum [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021,51(6):1002.
- [7] 陈从睿.潮汐作用下围堰与支护结构受力特性研究[D].成都:西南交通大学,2013.  
CHEN Congrui. The study on mechanical characteristics of cofferdam and supporting structure under the effect of tide [D], Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2013.
- [8] 寇强.潮汐动力作用下深大基坑渗流场演化特征及支护对策研究[D].济南:山东大学,2016.  
KOU Qiang. The study on seepage field evolution characteristics and supporting technology of large and deep foundation pit under the action of tidal dynamic [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [9] 李健,范方方.临海环境基坑渗流特性研究[J].水利水电技术,2019,50(7):202.  
LI Jian, FAN Fangfang. Study on seepage characteristics of foundation pit in seaward environment [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019,50(7):202.
- [10] 应宏伟,聂文峰,王啟铜,等.水位波动对临海重力式挡墙基坑稳定性的影响[J].海洋工程,2013,31(4):48  
Ying Hongwei, Nie Wenfeng, Wang Qitong, *et al.* The influence of water level fluctuation on the stability of the foundation pit of the gravity retaining wall near the sea [J]. Ocean Engineering, 2013,31(4):48.
- [11] 陈昆,闫澍旺,孙立强,等.开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J].岩土力学,2016,37(4):1075.  
CHEN Kun, YAN Shuwang, SUN Liqiang, *et al.* Analysis of deformation of deep foundation pit under excavation unloading condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,37(4):1075.
- [12] 张如林,徐奴文.基于PLAXIS的深基坑支护设计的数值模拟[J].结构工程师,2010,26(2):131.  
ZHANG Rulin, XU Nuwen. Numerical simulation of timbering design of deep foundation pits based on PLAXIS [J]. Structural Engineers, 2010,26(2):131.
- [13] 孙海霞,张科,陈四利,等.考虑渗流影响的深基坑开挖三维弹塑性数值模拟[J].沈阳工业大学学报,2015,37(5):588.  
SUN Haixia, ZHANG Ke, CHEN Sili, *et al.* 3D elastic-plastic numerical simulation on deep foundation pit excavation with considering dewatering effect [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015,37(5):588.