

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.018

基于分层地基模型的闸首分缝底板计算方法

何良德^{1,2},梅 霆²,周俊波³,谢 红³,孙保虎³

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098; 3. 湖北省交通规划设计院,湖北 武汉 430051)

摘要: 为研究深基坑开挖对地基沉降和分缝底板内力的影响,分析地基应力在船闸施工期、运行期的变化全过程,探讨土体回弹模量和压缩模量的关系,基于分层总和法,建立反映地基应力历史影响的非线性分层地基模型。结合龙洲垸船闸实例,探讨自重折扣法、并列铰接空间地基梁法在分缝底板计算中的应用。回弹模量比的影响分析表明,在合缝至完建期,底板下地基刚度呈现中部大、两侧小的特征,若不考虑再压缩模量的影响,则计算的底板沉降偏大、负弯矩偏小。通过多种合缝方案对比分析,建议合缝前边坡尽可能一次浇筑到顶,必要时再通过回填土调整底板内力。施工时应加强沉降与应力监测,应用基于分层地基模型的反分析方法,及时验证设计,动态调整施工方案,以确保底板弯矩在可控范围内。

关键词: 航道工程;船闸;分层地基模型;再压缩模量比;自重折减系数;空间地基梁
中图分类号:TV662⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)06-0698-06

Calculation method of parting floor of lock head based on layered foundation model

HE Liangde^{1,2}, MEI Ting², ZHOU Junbo³, XIE Hong³, SUN Baohu³

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Communications Planning and Design Institute of Hubei Province, Wuhan 430051, China)

Abstract: In order to study the effects of deep foundation excavation on foundation settlement and the internal force of a floor with broad joints prepared, the whole process of foundation stress variation during the construction and operation period of a lock was analyzed, the correlation between the rebound modulus and compression modulus was examined, and a nonlinear layered foundation model reflecting the foundation stress history effect was developed based on the layer-wise summation method. The method of deadweight reduction and the method of the spatial foundation beam hinged side-by-side in the parting floor calculation were evaluated and applied to the Longzhouyuan Ship Lock. Impact analysis of the resilient modulus ratio shows that, during the period from joint sealing to the end of construction, foundation stiffness was larger in the middle and smaller at both sides. Therefore, the floor settlement will be too large and the negative bending moment will be too small if the recompression modulus is not taken into consideration. Through analysis of several schemes regarding the sealed time of joints, the authors suggest that the side pier be poured at one time before joints are sealed, and backfilling be performed to adjust internal forces of the floor if necessary. It is necessary to strengthen settlement and stress monitoring, apply the back analysis method based on the layered foundation model, verify the design in time, and adjust the construction scheme, in order to ensure the floor's bending moment in control.

Key words: waterway engineering; ship lock; layered foundation model; recompression modulus ratio; deadweight reduction coefficient; spatial foundation beam

软基上船闸闸首一般采用整体坞式结构^[1]。为了减小边墩自重和边载产生的底板负弯矩,防止在墩后回填土过程中底板中部面层产生纵向裂缝,常采用“墩底分浇、预留宽缝、后期封合”的施工方案,即将底板在横向分为 3 块,各块间预留宽缝,后期再回填整浇^[2]。

分缝底板设计需要确定宽缝位置、合缝前边墩浇筑高度、回填土高度以及合缝时间。合缝前、后的计算需要考虑结构体系的转换以及地基固结特性的影响,方能较为准确地分析预留宽缝减小底板负弯矩的效果。苏超等^[3-4]提出了半无限黏弹性地基上基础梁的计算方法,可合理模拟分缝底板的受力特性,但由于模型系数较难确定,限制了该法的推广应用。陈璐等^[5]结合江苏省土基上船闸工程实例,介绍了工程界常用的自重折扣法,对自重折减系数的取值进行了探讨。周清华等^[6]、冯大江^[7]、刘晓平等^[8]先后基于 Biot 固结理论,应用有限元仿真分析技术,对土基固结沉降特性及其对分缝底板内力的影响进行了研究。

在初步设计阶段,为了快速进行方案比选和优化,仍常用规范推荐的分段-截条成梁法计算底板内力;在技术设计阶段,宜采用空间有限元法进行精细的结构分析。分段-截条成梁法通过不平衡剪力反映各特征段之间的相互作用,但并不满足接缝面位移协调条件,其次规范的剪力分配法不适用结构或荷载不对称的闸首计算^[9]。为了避免截条法的不足,何良德等^[10]提出了并列铰接空间地基梁法,可提高底板内力计算精度。

目前,船闸沉降计算常采用考虑闸基深开挖卸载回弹效应的 $e-p$ 回弹再压缩曲线、或 $e-\lg p$ 曲线的分层总和法。但在底板内力计算时常用文克尔地基、半无限或有限深弹性地基^[11]等模型,内力与沉降计算的地基模型没有得到统一。笔者在分层总和法的基础上,建立了考虑基坑卸载影响的非线性空间地基模型;基于自重折扣法和分层地基模型,结合工程实例提出模拟宽缝施工的分段、分块计算模型,分析再压缩模量比对底板沉降、内力的影响,探讨动态调整宽缝施工方案的优化设计思路。

1 考虑基坑卸载影响的地基模型

1.1 回弹与再压缩问题

在开挖大型基坑时,常观测到坑底土壤膨胀、底面升高的现象。高层建筑的箱基基底处的土自重压力(即开挖卸荷压力)占基底总压力的 50% ~ 70%;回弹再压缩量占完工时沉降量的比例在一般第四纪土中高达 30% ~ 60%,在沿海软土中虽小些,但也有 14% ~ 34%。以艾伦港船闸^[12]为例,基坑深度为 17.37 m,实测回弹量在中心线处为 8.8 cm,在坡脚处为 7.9 cm;船闸完建充水前实测沉降量为 5.8 cm,小于实测回弹量。前苏联在开挖船闸基坑(深 10 m 左右)和降低地下水位的同时,观测到坑底面升高 10 cm 以上。因此,回弹再压缩量问题在船闸工程中不容忽视。

1.2 再压缩沉降计算方法

现阶段坑底回弹量计算方法很多,有规范法、残余应力法、解析法和经验公式法等^[13]。根据地基应力历史,地基沉降将经历地基土回弹、再压缩沉降、附加应力沉降 3 个过程。底板施工时可近似认为地基土回弹已完成,底板沉降包括再压缩沉降、附加应力沉降两部分,可按式(1)计算:

$$s = s_1 + s_2 = \sum_{i=1}^n \left(\psi' \frac{p_c}{E'_{si}} + \psi_s \frac{p_0 - p_c}{E_{si}} \right) (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (1)$$

式中: s ——基础最终沉降量; s_1 ——地基回弹再压缩产生的沉降量; s_2 ——地基附加压力产生的沉降量; n ——土层数; ψ' ——考虑回弹影响的沉降计算经验系数,无经验时取 $\psi' = 1$; ψ_s ——沉降计算经验系数; E'_{si} 、 E_{si} ——基底下第 i 层土的回弹再压缩模量、压缩模量; p_c ——基底处地基土自重压力; p_0 ——基底压力; z_i 、 z_{i-1} ——基底至第 i 层、第 $i-1$ 层底面的距离; $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{i-1}$ ——基底计算点至第 i 层、第 $i-1$ 层范围内的平均附加应力系数。

回弹模量 E'_s 与回弹指数 C_e 之间存在以下关系^[13]:

$$E'_s = \frac{(p_2 - p_1)(1 + e_2)}{C_e \lg \left(\frac{p_2}{p_1} \right)} \quad C_e = \frac{e_1 - e_2}{\lg \left(\frac{p_2}{p_1} \right)} \quad (2)$$

式中: e_1 ——卸荷到一定荷载 p_1 后对应的孔隙比; e_2 ——卸荷前荷载 p_2 对应的初始孔隙比。

回弹指数 C_e 与压缩指数 C_c 之间存在一定的比例关系,一般黏性土的 $C_e \approx (0.077 \sim 0.200) C_c$ ^[13], $E'_s \approx (5 \sim 13) E_s$,表明回弹模量明显大于压缩模量数,对于工程实践有重要指导意义。

1.3 非线性分层地基模型

在建筑领域,常把计算沉降的分层总和法^[14-15]应用于地基上梁和板的分析。分层总和模型的主要优点是在于能较好地反映地基土扩散应力和变形能力,可以反映边载的影响,能考虑地基土沿水平与深度变化的非均匀性。此外,还便于修改模量,近似模拟地基土的非线性性质。

笔者基于式(1)提出考虑基坑卸载影响的非线性分层地基模型,地基沉陷计算公式为

$$\eta_{ij} = \sum_{t=1}^{n_i} \eta_{tij} \tag{3}$$

其中
$$\eta_{tij} = \begin{cases} \psi' \frac{\sigma_{0,tij}}{E'_{sti}} h_{ti} & \sigma_{0,tij} < \sigma_{c,ti} \\ \left(\psi' \frac{\sigma_{c,ti}}{E'_{sti}} + \psi_s \frac{\sigma_{0,tij} - \sigma_{c,ti}}{E_{sti}} \right) h_{ti} & \sigma_{0,tij} \geq \sigma_{c,ti} \end{cases}$$

式中: η_{ij}, η_{tij} ——由 j 节点处压力 p_j 在 i 节点处产生的沉降,以及在第 t 分层的压缩量; n_i ——第 i 节点处地基分层数; $h_{ti}, E'_{sti}, E_{sti}$ ——第 i 节点处地基中第 t 分层的厚度、回弹再压缩模量、压缩模量; $\sigma_{c,ti}$ ——第 i 节点处地基中第 t 分层由基坑开挖卸载引起的自重压力减小值; $\sigma_{0,tij}$ ——第 i 节点处地基中第 t 分层由 j 节点处压力 p_j 引起的竖向附加应力的平均值,可用该层中点处的附加应力值来代替(附加应力一般用 Boussinesq 公式计算,有基桩时应用 Mindlin 公式求解。沉降计算应考虑边载引起的垂直附加应力)。

2 施工过程的模拟方法

2.1 自重折扣法

自重折扣法,就是在合缝前和合缝后对结构自重和回填土自重进行不同程度的折减,然后分别计算合缝前、后的地基沉降和底板内力,近似模拟地基沉降和底板内力的变化过程,反映地基固结特性的影响。合缝前、后的计算原理与整体浇筑的底板相同。

假定合缝前边墩自重、底板自重、回填土自重的折减系数分别为 ξ_1, ξ_2, ξ_3 , 一般情况下 $0.3 < \xi_i < 0.9$ ^[5]。由于边墩土压力等水平荷载产生的地基沉降较小,其固结明显快于垂直荷载作用,因此,可不考虑水平荷载的折减作用。合缝前按分离式结构计算,中间底板与边墩(含边底板)自重互为边载。合缝前折减的荷载在合缝后剩余系数为 $1-\xi_i$, 新增荷载不考虑折减,合缝后按整体式结构计算。

2.2 空间地基梁法

闸首底板纵向长度为 b 、横向宽度为 l , 根据分段原则可将底板划分成 m 段, 成为 m 根并列空间地基梁, 梁宽分别为 b_i ; 再将 $m-1$ 个梁间截面、 m 个梁底接触面沿梁长方向分为 n 个区段, 如图 1(a) 所示。为了简化计算, 考虑到影响各段底板内力的主要因素, 可以认为梁间 $i-1$ 截面的 k 区段只产生竖向剪力 $Q_{i-1,k}$, i 梁底接触面的 k 区段只产生竖向地基反力 $N_{i,k}$, 如图 1(b) 所示。考虑到梁底地基反力的横向不均匀性, 可视分段宽度的大小, 适当增加 $N_{i,k}$ 分量的个数。为表述方便, 假定地基反力 $N_{i,k}$ 分成 $S_{i,k}$ 和 $T_{i,k}$, 如图 1(c) 所示。

对各梁分别采用混合法, 取固定于右侧面的悬臂梁作为基本系。未知值是各梁的 $Q_{i,k}, N_{i,k}$ 以及右端面的竖向位移 u_i 、横向转角 α_i 和纵向转角 β_i , 共有 $n(m-1)+m(2n+3)$ 个。

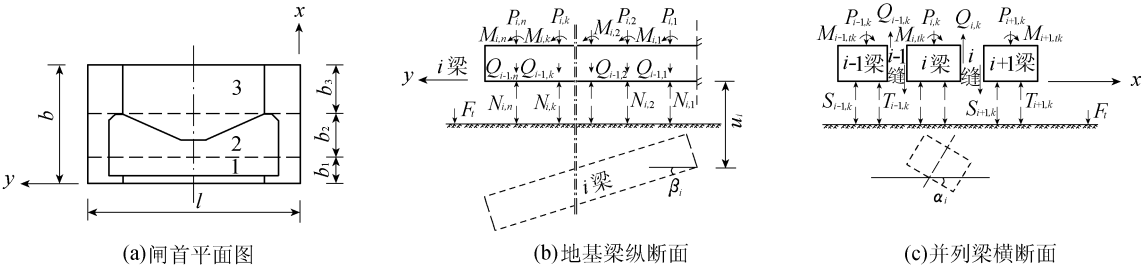


图1 并列铰接空间地基梁法计算图式

Fig. 1 Calculation chart of spatial foundation beam hinged side-by-side

根据梁间截面位移协调、梁底接触面位移协调以及梁力平衡条件,可写出混合法典型方程,用分块矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \omega_{QQ} & \omega_{QN} & -1 & -x_Q & -y_Q \\ \omega_{NQ} & \omega_{NN} + \eta_{NN} & -1 & -x_N & -y_N \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -x_Q & -x_N & 0 & 0 & 0 \\ -y_Q & -y_N & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q \\ N \\ u \\ \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta_Q \\ \Delta_N \\ -P \\ -M_T \\ -M_P \end{Bmatrix} \tag{4}$$

其中
$$\Delta_Q = \Delta_{QP} + \Delta_{QM_T} + \Delta_{QM_P}$$
$$\Delta_N = \Delta_{NP} + \Delta_{NM_T} + \Delta_{NM_P} - \Delta_{NF}$$

式中: x_Q, y_Q, x_N, y_N ——剪力 Q 和地基反力 N 的局部坐标; $\omega_{QQ}, \omega_{NQ}, \omega_{QN}, \omega_{NN}$ ——单位剪力和单位地基反力产生的挠度系数; η_{NN} ——单位地基反力产生的地基沉陷系数; $\Delta_{QP}, \Delta_{QM_T}, \Delta_{QM_P}$ ——梁上集中力 P 、扭矩 M_T 、弯矩 M_P 在梁间产生的挠度; $\Delta_{NP}, \Delta_{NM_T}, \Delta_{NM_P}, \Delta_{NF}$ ——梁上集中力 P 、扭矩 M_T 、弯矩 M_P 在梁底产生的挠度及边载 F 的地基沉陷(地基沉陷系数用式(3)求得,它与地基应力状态有关)。

2.3 非线性迭代方法

采用增量法模拟施工过程中的结构体系变换和荷载变化,利用链杆法原理,根据闸首的特点分段、分块,同时求解地基沉降、结构沉降、结构内力。计算分析时,追踪地基有效应力的变化,反映地基开挖卸载、结构施工加载以及运行期水荷载引起的卸载效应,记忆地基有效应力历史,判别卸载回弹及再压缩、加载压缩状态,分别采用 E'_{sti} 和 E_{sti} 计算地基沉降增量。

计算工况分为 4 种:(a) 基坑开挖暴露期;(b) 合缝前(分离式);(c) 合缝至完建期(整体式);(d) 运行期。计算工况用 T_i 表示($i=1 \sim 4$),共有 5 个时间节点($t_j, j=1 \sim 5$)。计算程序记忆 $j=4$ 的结果,然后分别完成挡洪、高水、低水、检修等运行工况的计算。

在基坑开挖暴露期,计算开挖引起的地基卸载及回弹量。在其他阶段,采用修正牛顿法进行非线性迭代求解。

3 计算实例

3.1 计算模型

龙洲垸船闸是引江济汉通航工程的进口船闸,位于湖北省长江沙市河段北岸。船闸在挡洪期、高水期、低水期、检修期的设计水头分别为 12.8 m, 9.98 m, -3.25 m 和 0.62 m。上闸首采用空箱式底板和边墩组成的整体坞式结构。底板纵向长度 b 、横向宽度 l 分别为 32.0 m 和 53.8 m,上、下底板厚分别为 1.1 m 和 3.5 m,总高度为 8.2 m。闸底高程为 16.3 m,门槛高程为 24.5 m,墩顶高程为 44.9 m。闸首口门宽度为 23.0 m,边墩宽度为 15.4 m,布置有三角闸门和短廊道输水系统。

船闸场地高程为 34.6 ~ 37.8 m,上闸首以卵石层作为持力层,泊松比 $\mu=0.27$,压缩模量 $E_{s0}=50$ MPa,换算得变形模量 $E_0=40$ MPa。考虑埋深效应的压缩模量按式(5)计算:

$$E_{st} = E_{s0} \left(\frac{h_t}{h_0} \right)^{0.5} \tag{5}$$

式中: h_t, E_{st} ——第 t 土层的埋深及压缩模量; h_0, E_{s0} ——卵石层顶埋深及压缩模量。

3.1.1 分段与分块

a. 分段:考虑结构、荷载纵向分布特征,将闸首底板分为 3 个特征段,分别为 $b_1=8.0$ m, $b_2=12.8$ m 和 $b_3=11.2$ m。分段面(横向截面)之间传递剪力、不传递弯矩。

b. 分块:在合缝前为了模拟宽缝施工的影响,按设计宽缝位置将每段底板分为 3 块,即中间底板、两侧边底板,分块面(纵向截面)之间不传递剪力、弯矩。合缝后每段形成整体。

c. 设置链杆:将底板沿横向等分为 27 个小段,纵向等分为 17 个小段,在 $27 \times 17=459$ 个区段中心设置链杆。区段长度分别为 $c_1=53.8/27=1.993$ m, $c_2=32.0/17=1.882$ m。

3.1.2 计算方案

按结构特征高程将边墩及回填土分别划分为 3 部分,计算相应的边墩自重、边载以及土压力增量,进行 4 类 13 种合缝施工工序分析,找出内力较少的施工方案。1 号为不设宽缝的整体浇筑方案;2 号、3 号方案合

缝前边墩浇筑高程为30.5 m,回填土高程分别为 16.3 m,30.5 m;5 号、6 号、7 号方案合缝前边墩浇筑高程均为 37.5 m,回填土高程分别为 16.3 m,30.5 m,37.5 m;10 号、11 号、12 号、13 号方案合缝前边墩浇筑高程均为 45.9 m,回填土高程分别为 16.3 m,30.5 m,37.5 m,44.0 m。为便于分析比较,2 号、4 号、8 号方案及 5 号、9 号方案分别为相同的方案。

3.2 地基模型比较

以不设宽缝的整体浇筑方案为例,假设为均质地基, $E_{st}=50\text{ MPa}$,完建期在结构上荷载(未包括边载)作用下,底板跨中弯矩 M_z 随压缩层厚度 H 的变化规律如图 2 所示。

在空间问题中,半无限地基和文克勒地基都是有限深弹性地基的特殊情况。当弹性层厚 $H\rightarrow\infty$ 时为半无限地基,当 $H\rightarrow 0$ 时即文克勒地基。本文的分层地基模型与有限深地基模型结果接近, $H/l>3.0$ 时与无限深地基模型结果差异小于 10%。 $H/l<0.1$ 时有限深地基模型、分层地基模型与文克尔地基模型结果差异小于 10%。

3.3 回弹模量比影响

以 7 号合缝方案为例,自重折减系数 $\xi_i=0.8$,取回弹模量比 ρ (即 E'_{st}/E_{st})分别为 1,3,10,20 进行计算,结果表明 ρ 较小时对底板跨中弯矩有显著的影响,在 $\rho>10$ 后弯矩变化减缓,随着 ρ 值增大运行期与完建期弯矩的差异逐渐变小,如图 3 所示。

合缝前,边墩处基底平均压力为 523 kPa,大于开挖卸载前土重有效压力(191 kPa),因此合缝前的施工使地基完成再压缩后进入加载状态,如图 4 中 $\rho=3$ 曲线的第 1 段;合缝后至完建期基底压力为 800 kPa,地基处于加载状态,此时底板沉降最大,如图 4 中 $\rho=3$ 曲线的第 2 段,与 $\rho=1$ 曲线基本平行;由于扬压力的作用,在不同的运行期基底压力为 387~598 kPa,始终小于完建期压力,地基一直处于回弹-再压缩状态,如图 4 中 $\rho=3$ 曲线的第 3 段。对中底板而言,施工期及运行期的基底压力一直较小,沉降主要由边墩作用产生。

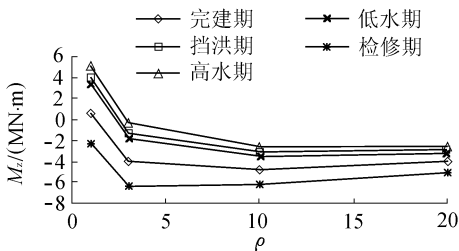


图 3 回弹模量比对跨中弯矩的影响

Fig. 3 Influence of rebound modulus on bending moment at mid-span

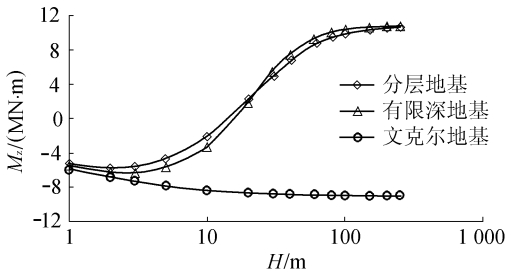


图 2 压缩层厚度对跨中弯矩的影响

Fig. 2 Influence of compressed layer thickness on bending moment at mid-span

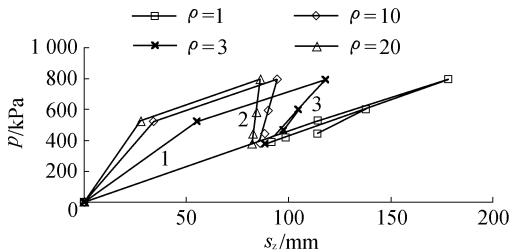


图 4 边墩基底压力 p 与跨中沉降 s_z 的关系

Fig. 4 Relationship between base pressure and settlement of side pier

3.4 合缝方案的影响

取 $\rho=3$ 以及 $\xi_i=0.8$ 时,不同施工方案的底板跨中弯矩包络值变化如图 5 所示。合缝前边墩顶高程越高,负弯矩越小。而对回填土而言,合缝前土重边载使得负弯矩减小,侧向土压力却使负弯矩增大,随着回填土增高,土压力对底板弯矩的影响逐渐大于土重边载的影响。合缝前,回填土高程为 16.3~30.5 m 时,底板负弯矩减小(3 号、6 号、11 号方案);回填土高程为 30.5~37.5 m 时,负弯矩变化不大(7 号、12 号方案);回填土高程为 37.5~44.0 m 时(13 号方案),底板负弯矩反而增大。

不设宽缝时,单宽弯矩在 $-6780\sim-17234\text{ kN}\cdot\text{m}$;墩顶高程为 30.5 m 的 2 号、3 号方案,还有减小负弯矩

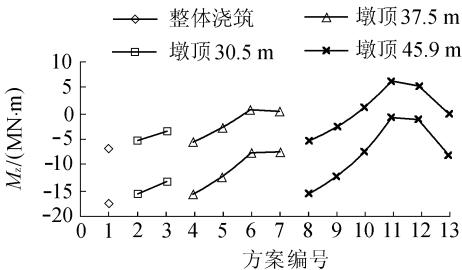


图 5 合缝方案对跨中弯矩包络值的影响

Fig. 5 Influence of schemes for joint sealing on envelop values of bending moment at mid-span

的余地;墩顶高程为37.5 m的6号、7号方案,与墩顶高程为45.9 m的10号方案效果相当。因此,为了方便施工,可以在合缝前边墩一次浇筑到顶高程45.9 m(10号方案),通过回填土调整底板内力(11号、12号、13号方案),控制弯矩在 $-8\,000 \sim +6\,298\text{ kN}\cdot\text{m}$ 范围内。施工时应加强对沉降变形及应力的监测,及时验证设计,动态调整施工方案,使底板弯矩在可控范围内。

4 结 语

a. 分层地基模型应用于弹性地基时,计算结果与有限深地基模型接近。笔者采用的非线性分层地基模型能够考虑地基土应力历史、应力水平的影响,适用于空间非均质地基,可使地基沉降和底板内力计算方法协调统一。

b. 分缝施工的中底板与边墩相比,其基底压力明显减小,浅部地基土始终处于回弹-再压缩状态,在合缝至完建期,底板下地基刚度呈现中部大、两侧小的特征。因此,如果不考虑回弹再压缩模量的影响,计算的底板沉降偏大,计算的正弯矩偏大或者负弯矩偏小。

c. 为了方便施工,在地基承载力允许的条件下,合缝前边墩一次浇筑到顶,尽可能地减小边墩重力的作用,以达到减小负弯矩的效果,必要时再通过回填土调整底板内力。

参考文献:

- [1] 刘晓平,陶桂兰.渠化工程[M].北京:人民交通出版社,2009:136-139.
- [2] 傅作新,张子明,孙一清,等.大型船闸底板分缝施工方案的研究[J].土木工程学报,1992,25(1):45-51. (FU Zuoxin, ZHANG Ziming, SUN Yiqing, et al. Study on method of setting up construction joint in large lock foundation plate[J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 25(1): 45-51. (in Chinese))
- [3] 苏超,姜弘道,谭恩会.黏弹性基础梁计算方法及其应用[J].河海大学学报:自然科学版,2000,28(5):101-105. (SU Chao, JIANG Hongdao, TAN Enhui. Computation method and application to viscoelastical foundation Beam[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2000, 28(5): 101-105. (in Chinese))
- [4] 苏超,王仙美,曹建中,等.船闸结构仿真计算方法研究[J].水运工程,2010(9):97-99,104. (SU Chao, WANG Xianmei, CAO Jianzhong, et al. Simulation method for shiplock structure[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(9): 97-99, 104. (in Chinese))
- [5] 陈璐,刘永强.自重折扣法在坞式底板设计中的应用探讨[J].水利水电科技进展,1999,19(6):41-43. (CHEN Lu, LIU Yongqiang. Application of calculation method of rebating deadweight to castle structure design[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1999, 19(6): 41-43. (in Chinese))
- [6] 周清华,边立明,徐泽中.墩底分浇式船闸闸首底板算法研究[J].水运工程,2003(1):43-46. (ZHOU Qinghua, BIAN Liming, XU Zezhong. A study on algorithm for lock head floor of ship lock of separately casted floor and piers[J]. Port & Waterway Engineering, 2003(1): 43-46. (in Chinese))
- [7] 冯大江.应用Biot固结理论的船闸闸首结构非线性有限元分析[D].南京:河海大学,2005.
- [8] 刘晓平,曹周红,桑雷,等.不同地基坞式船闸结构底板预留宽缝施工方法效果分析[J].水力发电学报,2007,26(3):54-58. (LIU Xiaoping, CAO Zhouhong, SANG Lei, et al. Effect of setting up wide construction joints for a shiplock floor built on different foundations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(3): 54-58. (in Chinese))
- [9] 刘秀魁.闸首底板不对称荷载作用下的内力计算分析[D].南京:河海大学,2010.
- [10] 何良德,李岗.船闸闸首底板计算方法探讨[J].水运工程,1997(12):30-34. (HE Liangde, LI Gang. Investigation and discussion of the calculation method for the lock head bottom plate[J]. Port & Waterway Engineering, 1997(12): 30-34. (in Chinese))
- [11] 张子明,赵光恒.有限深弹性层地基表面在矩形均布荷载作用下的沉降计算[J].华东水利学院学报,1986,14(1):67-78. (ZHANG Ziming, ZHAO Guangheng. Computation of surface settlement for elastic layer of finite depth subjected to rectangle uniform load[J]. Journal of East China Technical University of Water Resources, 1986, 14(1): 67-78. (in Chinese))
- [12] DUNCAN J M, CLOUGH G W. Finite element analysis of Port Allen lock[J]. ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(8):1053-1068.
- [13] 楼晓明,李德宁,杨敏.上海地区基坑底部粉质黏土回弹变形参数分析[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(4):540-545. (LOU Xiaoming, LI Dening, YANG Min. Statistical analysis for rebound deformation parameters of silty clay at Bottom of Deep Excavation in Shanghai[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(4): 540-545. (in Chinese))
- [14] 张静.筏板基础协调变形的内力及地基变形的研究[D].济南:济南大学,2011.
- [15] 高晓军,杨国平,陈驰,等.考虑不均匀地层及地基处理的地基刚度建模方法[J].建筑结构,2009,34(增刊1):805-807. (GAO Xiaojun, YANG Guoping, CHEN Chi, et al. Foundation stiffness model concerning uneven ground layers and ground treatment[J]. Building Structure, 2009, 34(Sup1): 805-807. (in Chinese))