

· 航道及通航建筑物 ·



厚覆盖层高水头船闸 闸室-省水池布置及地基处理方法^{*}

何良德¹, 王航¹, 黄挺¹, 庄宁¹, 耿卓²

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098,

2. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250031)

摘要: 京杭运河穿黄工程场地覆盖层深厚, 上跨方案的渡槽水位与两岸地面高差达 30 m 以上。针对渡槽两端的高水头船闸多级分散错层式省水池, 提出了墙背高填式、墙背低填式两种闸池布置方案。利用 ABAQUS 软件分别建立平面有限元模型, 研究了闸池沉降、闸室底板弯矩在施工期、使用期的全过程时空变化特征, 探讨了高填土对闸室的作用机理。结果表明: 1) 在天然地基条件下, 两种布置方案闸池沉降均较大, 墙背高填土下曳力、边载产生底板负弯矩, 基本上抵消了土压力产生的正弯矩, 导致两种方案底板弯矩差异不大, 且始终由负弯矩控制。2) 地基处理方法是减小闸池沉降、改善闸室受力条件的关键技术问题之一。3) 闸室、墙背填土的多桩型组合处理法和基坑外填土的排水固结预压法值得进一步深化研究。

关键词: 穿黄工程; 高水头; 省水船闸; 覆盖层; 闸池布置; 地基处理

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0071-07

Layout of lock chamber-water saving basin and foundation treatment method of high head ship lock with thick overburden

HE Liang-de¹, WANG Hang¹, HUANG Ting¹, ZHUANG Ning¹, GENG Zhuo²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250031, China)

Abstract: The overburden of the Yellow River-crossing scheme of the Beijing-Hangzhou canal is deep, and the water level of the aqueduct of the upper span scheme is more than 30 m above the ground on both sides of the river. Aiming at the multi-level scattered staggered water saving basins of high water head lock at both ends of aqueduct, two kinds of layout schemes of chamber-basin are put forward, which are wall back high fill type and wall back low fill type. We use ABAQUS finite element software to build plane finite element models, research the spatial-temporal variation characteristics of the settlement of the chamber-basin and the bending moment of the floor of the lock chamber during the construction and service periods, and discuss the action mechanism of the high fill on the lock chamber. The results show that: 1) Under the condition of natural foundation, the settlement of the chamber-basin in the two layout schemes is relatively large, and the negative bending moment of the floor generated by the drag down force and side load of the high fill on the back of the wall basically counteracts the positive bending moment generated by the soil pressure, which leads to the little difference of the bending moment of the floor in the two schemes and is always controlled by the negative bending moment. 2) The foundation treatment method is one of

收稿日期: 2021-05-19

*基金项目: 山东省交通运输科技项目(2017B79); 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室开放基金资助项目(YT918001)

作者简介: 何良德(1964—), 男, 硕士, 副教授, 从事港口与航道工程教学和科研。

the key technical problems to reduce the settlement of the chamber-basin and improve the stress condition of the lock chamber. 3) The method of multi-pile combination treatment of lock chamber and wall back filling and the method of drainage consolidation preloading of the filling outside foundation pit are worthy of further study.

Keywords: the Yellow River-crossing engineering; high water head; water-saving ship lock; overburden; layout of chamber-basin; foundation treatment

省水船闸的省水池有水平展开的分散式、竖向叠层的集中式、混合式等 3 种布置形式^[1]。德国是已建省水船闸最多的国家，单级船闸最大水头 24.67 m，省水池大多采用 2~3 级的分散式布置。近 10 年来，我国学者研究了在重庆乌江干流、广西西江支流、山东小清河等地区带省水池船闸的布置方案。其中小清河复航工程的水牛韩、金家堰、王道船闸最大水头 5.4 m，现已开工，将成为国内首批带省水池的船闸^[2]。

穿黄工程是京杭运河黄河以北段复航的关键工程，目前普遍认为平交方案不可行^[3-5]；而在立交方案中，渡槽上跨方案与隧洞下穿方案相比，技术较为成熟、操作工艺简单、维修管理更为方便。连接渡槽的北岸通航建筑物水头差为 35.67 m、南岸水头差为 33.57 m，可分别采用带 8 级分散错层式省水池^[6]的船闸。闸室两侧省水池近高远低、或近低远高错层式布置时，可形成闸室墙背高填式、墙背低填式两种布置方案。

京杭运河穿黄段位于解山、位山地区，此处残山孤立散布、周围覆盖层深厚^[7]，黄河两岸地势低平，与渡槽水位高差达 30 m 以上，高水头船闸省水池的高填方土重力、闸室自重力和水重力将产生较大沉降，同时省水池填方将对闸室产生墙背土压力、墙背下曳摩擦力^[8]和底板边载作用，从而影响闸室结构内力。本文利用 ABAQUS 有限元软件建立数值模型，在天然地基条件下，研究两种布置方案的地基沉降分布特征和闸室结构受力特性，探讨墙背填土对底板的作用机理，提出闸室、墙背填土、基坑外填土的地基处理方案，

可为类似工程提供参考和借鉴。

1 分散错层式闸池布置方案

渡槽方案是在黄河上方建造通航渡槽，两端利用通航建筑物连接京杭运河。以水头差最大的北岸船闸为例，设计水头为 35.67 m，京杭运河最高通航水位为 39.57 m、最低通航水位为 37.20 m、渡槽水位为 72.87 m。

渡槽方案的船闸设计水头差大，闸室基本尺度为 34 m×280 m×5 m，一次过闸所需的耗水量极大，而渡槽水位又要求维持不变，省水率需要尽可能高，因而设计建造 8 级分散式省水池以减少船闸用水量。省水池水域面积与闸室面积相同，各级省水池最小水深 1.0 m、挡墙富余高度 1.0 m。

船闸采用四区段等惯性分散输水主系统，两侧 8 级省水池输水廊道分别与主系统的闸墙长廊道连接。闸室采用 U 形整体式结构，底板总宽 64.0 m、厚度 13.0 m，闸墙顶宽 4.0 m、底宽 15.0 m、高度 42.8 m，底板顶高程 32.2 m、底高程 19.2 m，闸墙顶高程 75.0 m。场地地面高程约 40.0 m，开挖深度 20.8 m 的基坑后施工闸室结构。

为了改善闸室结构受力条件，8 级分散式省水池交错布置在闸室的两侧，近似对称分布，一侧布置第 1、第 3、第 5、第 7 级省水池，另一侧布置第 2、第 4、第 6、第 8 级省水池。图 1 为两种省水池布置方案拼接图，左侧为墙背高填式布置方案，右侧为墙背低填式布置方案（后文拼接图排版方式相同）。

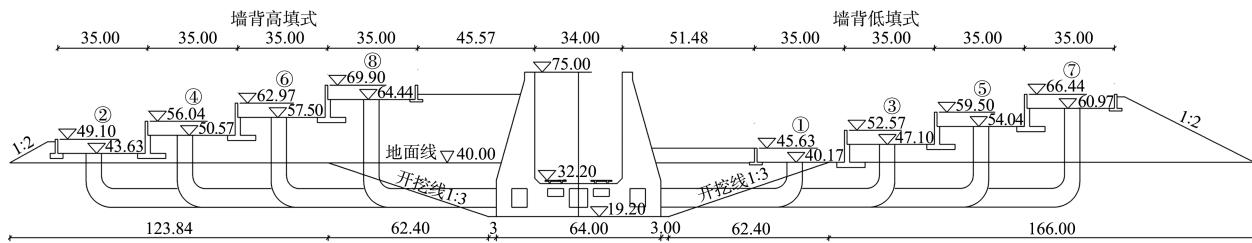


图1 墙背高填式、低填式拼接 (单位: m)

2 有限元模型的建立

2.1 几何模型

由于船闸闸室结构的横断面形状和大小沿闸室长度方向保持不变, 且外荷载与船闸纵轴线垂直, 故可按平面应变问题分析。利用ABAQUS分别对两种布置方案建立平面有限元模型, 整个模型包括闸室、省水池、填土和地基4个部分, 考虑到边界效应对分析结果的影响, 地基土体两侧分别从省水池填土坡角向外延伸150 m, 地基覆盖层厚度51.5 m、模型的地基深度120 m。基坑开挖坡度1:3、填土坡度1:2, 并在闸墙两边各预留3 m宽的马道以便施工。

模型地基底部设置全约束, 左右边界约束水平位移。闸室、省水池、填土和地基均为均质实体单元, 通过设置接触面模拟结构与土的相互作用, 接触面摩擦系数取0.3。

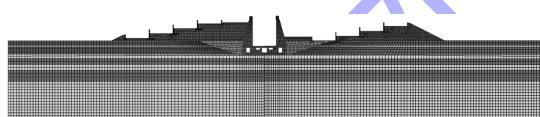


图2 两种布置方案有限元模型拼接

2.2 材料模型

闸室、省水池的混凝土结构和地基的岩层采用线弹性模型。混凝土设计强度C25, 密度 $\rho=2450 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E=28 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu=0.167$ 。

填土采用D-P模型、地基覆盖层采用剑桥模型, 水下采用浮密度、水上则为湿密度。填土湿密度 $\rho=1.97 \text{ t/m}^3$ 、浮密度 $\rho'=1.06 \text{ t/m}^3$, 内摩擦角 $\varphi=28^\circ$, 黏聚力 $C=17.3 \text{ kPa}$, 变形模量 $E=22.29 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu=0.33$ 。

剑桥模型有 M 、 β 、 K 、 a_0 、 λ 、 κ 、 μ 、 e_0 、 p_0 等参数^[9]。其中: 在 p - q 平面上临界状态线斜率 M 简称为应力比, 根据内摩擦角求得; β 、 K 分别为屈服面在 p - q 平面、 π 平面的形状控制参数, $\beta=1$, $K=0.8$; a_0 为初始屈服面与临界状态线交点的 p 值; λ 、 κ 分别为等向压缩、回弹时 v - lnp 平面内曲线斜率; μ 、 e_0 、 p_0 分别为泊松比、初始孔隙比、前期固结压力。

工程场地地层可划分10层, 地基土主要计算参数见表1, $\kappa=\lambda/10$, 粉土层水上湿密度 1.86 t/m^3 。

表1 各层地基土主要计算参数

土层	层厚/m	层底高程/m	$\rho'/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi/(^\circ)$	C/kPa	E/MPa	λ	M	e_0	μ
粉土	6.3	33.7	9.7	22.4	12.3	5.57	0.040 4	0.873	0.759	0.30
粉质黏土	3.1	30.6	10.2	16.1	23.8	3.37	0.072 3	0.611	0.670	0.33
细砂	10.1	20.5	10.4	32.0	0	11.14	0.030 5	1.287	0.642	0.30
粉质黏土	6.6	13.9	10.4	17.0	24.7	5.73	0.072 2	0.648	0.635	0.32
中细砂	8.3	5.6	10.0	32.0	0	14.86	0.036 1	1.287	0.701	0.30
粉质黏土	8.5	-2.9	10.2	16.0	24	6.43	0.084 3	0.607	0.667	0.32
粉质黏土	8.6	-11.5	10.2	16.0	24	7.13	0.082 8	0.607	0.666	0.32
强风化石灰岩	1.5	-13.0	11.6	37.0	180	391.11	-	-	-	0.28
弱风化石灰岩	5.9	-18.9	12.6	60.0	440	2 500.00	-	-	-	0.25
微风化石灰岩	-		14.8	72.0	700	7 740.00	-	-	-	0.20

2.3 单元追踪技术

在进行数值模拟过程中, 发现填土激活时与

闸墙背面接触有初始脱开的现象, 导致数值模拟时闸墙所受的土压力小于实际所受土压力。在实

际施工过程中, 填土分层填筑时, 是与闸墙背面紧密接触的, 为此特采用一种具备“追踪功能”的填土备份单元。备份单元与被追踪单元形状完全一致, 共享节点, 备份单元可赋予为无密度、弹性模量极小的“空气单元”, 参与其他已激活单元的整体计算时, 可自动调整备份填土与闸墙接触间隙, 使得两者保持紧密接触, 而不影响原有结构受力特性。这样实际填土激活时, 填土与闸墙无初始脱开的现象, 模拟的土压力更符合实际情况。

2.4 计算工况与计算步

计算工况包括施工期、完建期、使用期(高水期、低水期和检修期)等工况。施工前地下水位 39.2 m, 施工期及完建期地下水位线为基坑开挖线, 使用期地下水位上升恢复为 39.2 m 水平线。施工期、完建期、检修期闸室、省水池无水; 高水期、低水期闸室水位分别为 72.87、37.20 m, 省水池为相应低水位、高水位。

为更好地模拟施工过程, 分析各个阶段对闸室沉降、底板内力的影响, 计算步分为: 首先地应力平衡, (1)基坑开挖, (2)底板浇筑, (3)闸墙浇筑, (4)回填至原地面, (5)~(8)分别为第 1、2 级, 第 3、4 级, 第 5、6 级, 第 7、8 级省水池填土和挡墙浇筑, 其中(8)为完建期、(9)为高水期、(10)为低水期、(11)为检修期。

3 闸池沉降与受力特性

3.1 地面线沉降

为观察地基沉降的分布特征, 沿着开挖后的地面线整理不同阶段地基的沉降分布曲线, 见图 3。

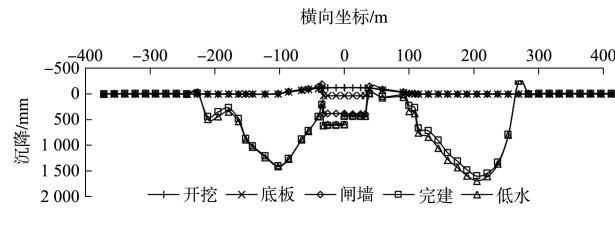


图 3 地基沉降分布曲线拼接

两种方案在填土前沉降完全相同, 沉降主要

发生在基坑内, 开挖时坑底回弹 128 mm, 约占坑深的 0.68%, 计算值与经验值接近^[10], 闸室底板、闸墙浇筑分别产生 163、350 mm 沉降增量, 基坑经历卸荷回弹再加载压缩后, 坑底沉降 385 mm。

随着省水池填土和挡墙施工, 所在地基出现明显沉降盆, 并对坑底沉降产生不同程度的影响。墙背低填式完建时坑底沉降增量为 54 mm、最大沉降 1 604 mm, 发生在最高的第 7、8 级省水池下, 距离闸室轴线 205 m; 墙背高填式坑底沉降增量为 226 mm, 由于基坑回填的置换作用、填土通过墙背摩擦力的扩散作用, 最大沉降为 1 450 mm, 位置偏离至第 5、6 级省水池下, 产生在基坑边顶外侧处, 距离闸室轴线 98 m。相对而言使用期地基沉降变化不大, 由于低水期省水池处于高水位, 地基沉降出现最大值。

3.2 闸室沉降

以基坑开挖后计算结构沉降, 闸室轴线处底板沉降随施工计算步变化曲线见图 4。闸室结构自重产生的沉降 513 mm, 墙背低填式在基坑回填(施工步(4))、第 1、2 级省水池填土时, 对底板沉降有一定影响, 后续各级省水池填土的影响极小, 完建时(施工步(8))沉降 567 mm, 其中施工步(4)~(8)填土产生的沉降占 9.5%。墙背高填式完建时沉降 733 mm; 填土产生沉降 225 mm, 占 30.8%。

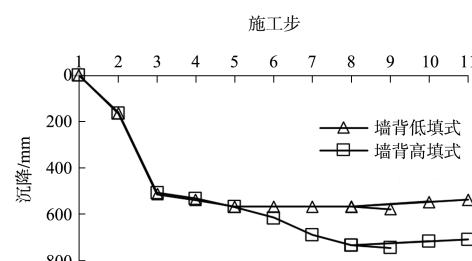


图 4 底板沉降随施工计算步变化曲线

两种方案在使用期沉降变化规律一致, 受浮托力作用, 低水期和检修期出现向上“浮起”增量-22、-30 mm; 高水期闸室内水重力大于浮托力, 沉降增量 12 mm。闸室在高水期沉降最大, 墙背高填式、低填式分别为 745、579 mm。

3.3 底板弯矩

两种方案的底板弯矩分布基本一致, 从底板

边缘至跨中弯矩绝对值逐渐增大。底板自重作用下, 底板弯矩较小; 闸墙施工后, 底板两端受力, 产生明显的负弯矩, 呈上部受拉、下部受压的状态。省水池填土使得底板负弯矩进一步增大。高水期闸室内水压力使得底板负弯矩出现最大值, 检修期、低水期弯矩略大于完建期。总体来看, 两种方案的弯矩差异并不显著。底板弯矩分布曲线拼接见图 5。

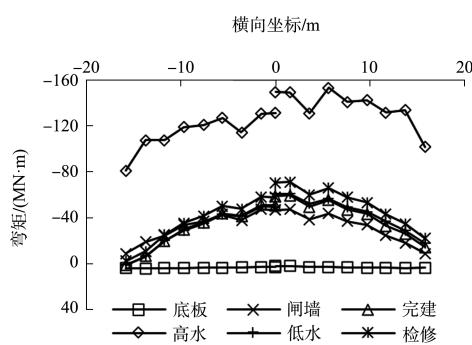


图 5 底板弯矩分布曲线拼接

4 墙背填土作用机理

4.1 填土的 3 种作用

填土对底板沉降和受力的影响主要是由填土与闸墙之间的土压力、下曳力以及填土自重(闸室结构外边载)所引起的。

以墙背高填式为例, 填土与墙背间存在接触面应力, 土压力、下曳力见表 2, 土压力接近静止土压力分布, 对底板产生 87.4~98.5 MN·m 的集中力偶作用。

表 2 墙背土压力、下曳力

工况	土压力 /kN	土压力集中力偶 /(MN·m)	下曳力 /kN
完建期	7 927.1	88.1	2 348.0
高水期	8 406.3	98.5	1 621.2
低水期	7 946.2	87.4	2 309.3
检修期	8 017.3	88.5	2 373.5

在原模型的基础上, 新增填土与墙背之间摩擦系数 $f=0$ 、填土临墙背面设置法向约束的两种有限元模型计算, 将计算结果与原模型完建期结果进行对比, 可分离出土压力、下曳力和边载等因素各自产生的底板沉降、弯矩。

4.2 对闸室沉降的影响

土压力产生的底板沉降跨中大、两端小, 跨中弯矩为 89.6 MN·m。填土沉降大于闸墙沉降, 墙背摩擦力形成的下曳力引起底板沉降两端大、跨中小, 跨中负弯矩 -44.5 MN·m。不直接作用在闸墙的填土自重引起闸墙外侧地基沉降, 进而影响闸室内力, 这种边载引起的底板端部沉降 125 mm, 跨中略小, 底板端部与地基有脱开趋势, 跨中负弯矩 -42.3 MN·m。填土对底板沉降影响见图 6。

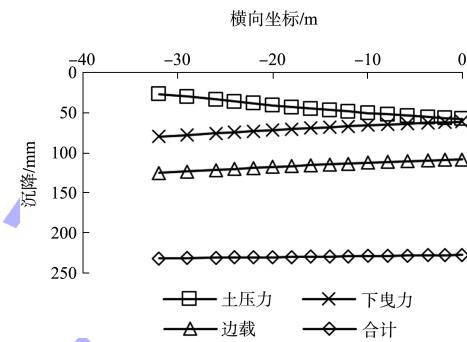


图 6 填土对底板沉降影响

边载对底板沉降的影响最为明显, 占 47.6%~54.0%。从底板跨中至边缘处, 土压力的影响为 11.6%~22.5%, 逐渐减小; 下曳力的影响为 26.9%~34.4%, 逐渐变大。

4.3 对底板弯矩的影响

填土对闸墙的土压力在底板上产生正弯矩, 使底板呈上部受压、下部受拉状态, 而填土的下曳力、边载对底板产生负弯矩。从绝对值来看, 土压力的弯矩约为下曳力、边载弯矩的 2 倍, 但正负弯矩相互抵消, 导致填土的实际合弯矩较小。这也是导致两种方案底板弯矩差异并不显著的重要原因。填土对底板弯矩的影响见图 7。

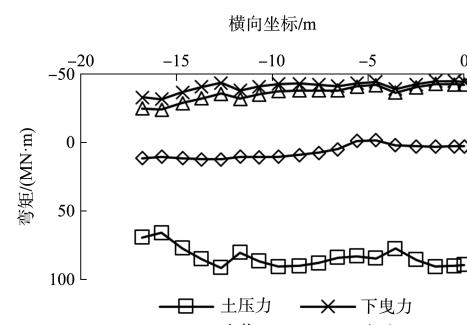


图 7 填土对底板弯矩的影响

5 地基处理方案

5.1 阀室地基处理

穿黄段覆盖层深厚, 天然地基条件下阀室结构自重使得底板产生较大沉降和负弯矩, 且后期始终以负弯矩控制。

采用“预留宽缝, 后期封合”的施工方法, 浇筑时在中间底板与阀墙间预留宽缝, 在地基承载力允许的条件下, 阀墙一次浇筑到顶, 在满足横向稳定性条件下, 墙后填土到一定高度后再封合宽缝^[11]。宽缝封合前, 阀墙与底板分离, 可以减小阀墙自重、填土下曳力和边载对中底板产生的负弯矩。宽缝封合时, 地基沉降固结已大致完成, 合缝之后阀室转换为整体式结构, 承受后期施工的阀墙、填土以及使用期荷载作用。

为了提高地基承载力, 减小阀室总沉降和阀墙、底板差异沉降, 阀室下需要进行地基处理。两侧阀墙地基反力大, 且合缝前承受填土水平力, 采用钻孔灌注桩复合桩基^[12]或管桩复合桩基^[13]。如果采用管桩复合桩基, 应密切注意在水平力作用下桩身的抗弯抗剪能力; 中底板地基反力小, 且水平力自身平衡, 可采用管桩复合桩基、管桩

或 CFG(水泥粉煤灰碎石)桩复合地基。在工序安排上, 可先施工阀墙、稍后施工中底板, 更有利于阀墙、底板长廊道在高程上的对接。

5.2 墙背填土地基处理

墙背高填土的沉降占比高达 30.8%, 且高填土下曳力、边载产生的负弯矩很大, 一部分抵消了土压力产生的正弯矩。靠近墙背外侧一定范围内进行水泥搅拌桩、CFG 桩或管桩复合地基处理, 可减小填土的不利影响。采用管桩复合地基时, 宜在桩顶设置桩帽^[14]充分发挥管桩承载力、增大管桩间距减小管桩用量。由于相同边载离开墙背越远影响越小, 且基坑范围内离开墙背越远填土荷载越小, 复合地基加固体横向间距应遵循近密远疏的布置原则。

墙背高填土方案阀墙的灌注桩外径 1.0 m、桩长 32.2 m, 纵横向间距 2.5 m×2.4 m~2.5 m×2.7 m, 桩顶与阀墙结构刚接。中底板下管桩外径 0.6 m、桩长 30.3 m, 间距 2.5 m×2.4 m, 桩顶设有 0.4 m 碎石垫层。填土区管桩外径 0.6 m、桩长 30.0 m, 间距 2.5 m×2.2 m~2.5 m×2.8 m, 桩帽 1.6 m×1.6 m、厚度 0.4 m。初步提出的刚性桩组合见图 8。

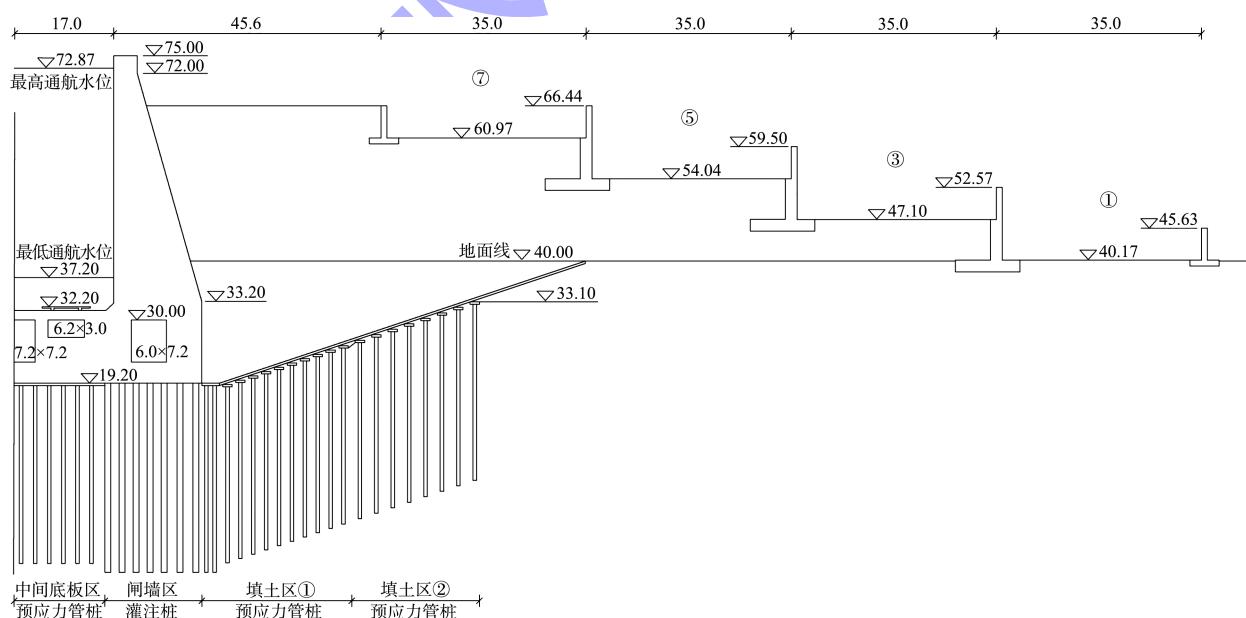


图 8 刚性桩组合处理方案 (单位: m)

5.3 基坑外地基处理

基坑外填土沉降虽然较大, 但对阀室影响较

小, 因此可仅采用排水固结法进行地基处理, 在分层填筑时自动实现沉降补方以消除部分沉降的

影响。填土完成后, 经过一定的预压期, 待沉降稳定后再施工省水池挡墙及其护底。

6 结论

1) 在天然深厚覆盖层地基条件下, 京杭运河穿黄工程省水船闸的墙背高填式、墙背低填式方案最大地面沉降均发生在省水池下, 分别高达 1.45、1.60 m。高填式闸室沉降 745 mm, 大于低填式的沉降 579 mm, 其中闸室自重的沉降均为 513 mm, 填土的沉降分别为 225、54 mm, 使用期沉降变化均较小。

2) 两种布置方案的闸池沉降和受力特性差异主要来自于墙背填土作用不同。填土边载产生的闸室沉降依次大于下曳力、土压力产生的沉降, 土压力产生闸室底板正弯矩, 而下曳力、边载产生负弯矩, 正负弯矩相互抵消, 导致填土的合弯矩较小。这也是导致两种方案底板弯矩差异不大, 且始终由负弯矩控制的重要原因。

3) 基于闸池沉降与受力特性以及填土作用机理分析, 考虑“预留宽缝, 后期封合”施工方法, 初步提出的闸室、墙背填土的刚性桩组合处理方法可减小闸室沉降、改善闸室受力条件。基坑外采用排水固结预压法处理, 有利于缩短工期、降低造价。穿黄工程省水船闸的分散多级错层式省水池布置方案以及地基处理方案值得进一步深化研究。

参考文献:

[1] 何思远, 于贝, 戈国庆, 等. 集中式省水船闸若干问题研

(上接第 65 页)

参考文献:

- [1] 中交路桥技术有限公司. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [2] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 港口道路与堆场设计规范: JTS 168—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [3] KNAPTON J. The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries [M]. Leicester: Interpave, 2007.
- [4] British Standards Institution. Maritime Works—Part 1-2:

究[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(4): 6-10.

- [2] 何良德, 戈国庆, 杨晓松, 等. 金家堰省水船闸互通式短廊道输水系统计算[J]. 水运工程, 2021(2): 64-70, 88.
- [3] 闵朝斌. 京杭运河穿黄工程探析[J]. 水运工程, 2015(4): 139-144.
- [4] 韩巍巍, 刘晓玲, 袁和平. 京杭运河山东段全线通航可行性分析[J]. 水运工程, 2016(S1): 98-102.
- [5] 戈国庆, 耿卓, 董思远. 京杭运河穿黄及黄河北航道走向探析[J]. 港工技术, 2020, 57(1): 18-21.
- [6] 朱新望. 高水头分散式省水池布置与闸室受力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2020.
- [7] 李通文. 南水北调东线穿黄隧洞工程地质问题探讨[J]. 水利水电工程, 1991(1): 15-18.
- [8] 刘晓平. 对坞式结构常规设计方法的探讨[J]. 长沙交通学院学报, 1995, 11(4): 67-72.
- [9] 吕阳. 基于三轴试验的 ABAQUS 修正剑桥模型参数分析[J]. 土工基础, 2016, 30(6): 651-657.
- [10] 徐彪, 刘佳. 对深基坑坑底隆起问题的探讨[J]. 广西工学院学报, 2004, 15(1): 66-68, 77.
- [11] 何良德, 梅霆, 周俊波, 等. 基于分层地基模型的闸首分缝底板计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 698-703.
- [12] 金国强, 刘耿耿, 徐朝辉, 等. 杭甬运河设计回顾与总结[J]. 水运工程, 2009(9): 116-121.
- [13] 孙保虎, 何良德, 何英发, 等. PHC 刚性管桩基础上的闸首底板内力计算方法[J]. 水道港口, 2014, 35(1): 73-80.
- [14] 何良德, 陈志芳, 徐泽中. 带帽 PTC 单桩和复合地基承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 435-440, 444.

(本文编辑 武亚庆)

General—Code of Practice for Assessment of Actions: BS 6349-1-2[S]. London: British Standards Institution, 2016.

- [5] British Standards Institution. Eurocode 1: Actions on Structures—Part 2: Traffic Loads on Bridges: BS EN 1991-1-2[S]. London: British Standards Institution, 2013.
- [6] AASHTO Joint Task Force on Pavements. AASHTO guide for design of pavement structures [M]. Washington D.C.: AASHTO, 1993.

(本文编辑 武亚庆)