

施工宽缝对整体式闸室底板内力影响分析

钟华林¹, 陈琨², 肖洪杰³

(1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060;
2. 云南省安宁市水务局, 云南 昆明 650300; 3. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 针对施工宽缝影响整体式闸室底板内力的问题, 进行不同宽缝位置、封缝前不同填土高度、不同地基基础条件下底板弯矩计算分析与研究。采用有限元方法, 以检修工况为例, 对有宽缝与无宽缝的情况进行对比。结果表明: 宽缝与边墙距离 L 为 3~17 m 时, 跨中负弯矩减小 26%~39%; 封缝前填土高度 3~9 m 时, 跨中负弯矩减小 18%~40%; 对土基或复合地基, 弹性模量取 20~100 MPa 时, 跨中负弯矩减小 29%~33%; 对桩基础, 土体弹性模量取 20~40 MPa 时, 跨中负弯矩减小 41%~45%; 对岩基, 跨中负弯矩不变。在土基、复合地基或桩基础条件下, 宽缝宜对称布置在 L 为 0.1~0.2 倍闸室口宽处, 此时宽缝处弯矩和应力最小; 在岩基条件下, 可采用施工缝代替施工宽缝。

关键词: 施工宽缝; 底板内力; 地基; 桩基础

中图分类号: U641.3+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0161-07

Influence of construction wide joints on internal forces of bottom plate in integral lock chamber

ZHONG Hualin¹, CHEN Kun², XIAO Hongjie³

(1. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China;
2. Water Affairs Bureau of Anning City, Kunming 650300, China; 3. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In response to the problem of the influence of construction wide joints on the internal force of the integral lock chamber bottom plate, the bending moment calculation analysis and research of the bottom plate are carried out under different wide joint positions, different filling heights before sealing, and different foundation conditions. Using the finite element method, taking maintenance conditions as an example, the situation with wide joints is compared with no wide joint. The results show that when the distance between the wide joint and the side wall L is 3~17 m, the negative bending moment at the mid span decreases by 26%~39%. When the filling height before sealing is 3~9 m, the negative bending moment at the mid span decreases by 18% to 40%. For soil or composite foundations, when the elastic modulus is taken as 20~100 MPa, the negative bending moment at the mid span decreases by 29%~33%. For pile foundations, when the elastic modulus of the soil is set to 20~40 MPa, the negative bending moment at the mid span decreases by 41% to 45%. For rock foundations, the negative bending moment at the mid span remains unchanged. Under soil foundation, composite foundation, or pile foundation conditions, the wide joints should be symmetrically arranged at L ranging from 0.1~0.2 times the width of the lock chamber, where the bending moment and stress are minimized. Under rock foundation conditions, construction joints can be used instead of construction wide joints.

Keywords: construction wide joint; internal force of bottom plate; foundation; pile foundation

整体式闸室对水位、荷载及地基的适应性较强, 是船闸工程常用的一种结构形式。整体式闸

室结构常在底板上设置施工宽缝, 已有文献^[1]表明, 施工宽缝能够改善底板工作条件, 减小底板

负弯矩，进而节省工程量。

已有的相关研究取得了一定的成果，如丁希雅等^[2]采用有限元法对船闸施工宽缝结构形式、尺寸对大体积混凝土温度应力的影响进行分析；徐闪等^[3]对船闸底板封缝条件进行总结；李成等^[4]、杨旭等^[5]采用有限元法对船闸施工宽缝位置及封缝时间进行研究；刘江林等^[6]对考虑施工过程的闸室底板内力进行分析。本文在此基础上，采用有限元法进一步对施工宽缝位置对底板弯矩和应力的影响、宽缝受力机理、封缝前填土高度对闸室底板内力的影响、不同地基基础条件下宽缝对闸室底板内力的影响进行分析，提出了施工宽缝的设计思路。研究成果可以为整体室闸室结构设计提供借鉴。

1 工程概况

某船闸有效尺度 $230\text{ m} \times 34\text{ m} \times 6\text{ m}$ (长×宽×门槛水深)，设计水位见表 1。闸室采用整体式结构，闸室顶高程 5.76 m，底板底高程 -9.80 m，底板厚 3.0 m。底板沿中心线对称布置 2 道施工宽缝，宽缝与闸室边墙前沿的距离为 L ，见图 1。闸室底板坐落于粉砂层。

表 1 设计水位
Tab. 1 Design water level

位置	设计最高通航水位/m	设计最低通航水位/m	检修水位/m
上游	3.06	0.81	1.33
下游	4.96	-0.80	1.42

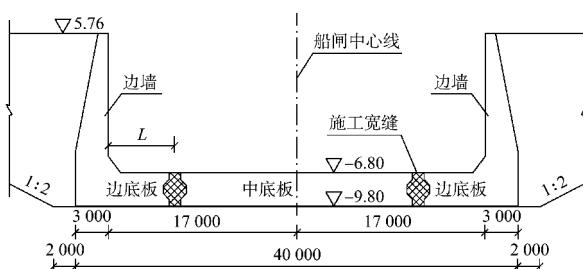


图 1 闸室结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig. 1 Cross section of lock chamber structure (elevation: m; dimension: mm)

2 有限元数值分析模型

采用有限元软件对闸室结构内力进行计算。闸室底宽 40.0 m，地基宽度按 3 倍结构宽度取 120.0 m，地基深度按 1.5 倍结构宽度取 60.0 m^[7]。

2.1 闸室结构及土体模型

2.1.1 闸室结构模型

闸室及土体有限元整体模型见图 2。闸室结构采用三维实体单元 C3D8R 模拟，本构模型采用线弹性模型。弹性模量 30.0 GPa，泊松比 0.2。

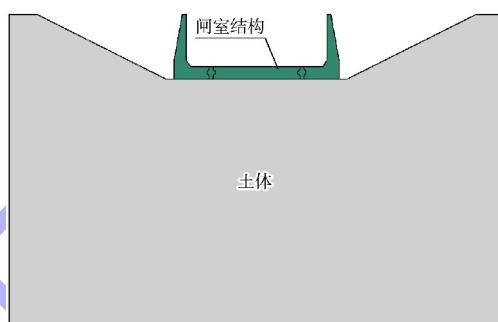


图 2 闸室及土体有限元整体模型
Fig. 2 Overall finite element model of lock chamber and soil

2.1.2 土体本构模型

对地基土建立三维有限元模型。土体采用三维实体单元 C3D8R 模拟，本构模型采用弹性模型。为简化计算，本文对土层参数进行统一处理。地基土参数：密度 1960 kg/m³，弹性模量 40.0 MPa，泊松比 0.30。

2.2 设计荷载

2.2.1 自身重力、水压力、扬压力

根据 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》^[8]计算结构自身重力、边墩外侧水压力、底板底面扬压力。

2.2.2 土压力

根据 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》计算边墩外侧土压力，按静止土压力考虑。为满足边墙抗滑、抗倾稳定性及地基承载力要求，封缝前填土至 H_1 高程；封缝后填土至顶面 H_2 高程，见图 3。

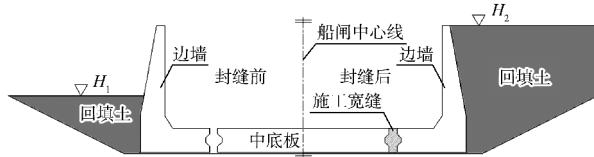


图 3 整体式闸室填土高程

Fig. 3 Filling elevation of overall lock chamber

2.2.3 边载

边载由边墙后方填土自身重力产生, 本文主要讨论宽缝对内力的影响, 计算时边载不折减。边载分为封缝前边载和封缝后边载, 其取值为回填土重力。水位以下按浮重力密度计算。

2.3 接触的设置

底板与地基土之间设置接触对, 切向设置摩擦, 摩擦系数取 0.35; 法向设置硬接触。

2.4 施工宽缝的模拟

采用单元“生”和“死”模拟施工宽缝^[9]。在计算前先“杀死”施工宽缝单元, 施加封缝前边载、土压力和自身重力, 完成封缝前计算后, 再“激活”被杀死单元, 重新施加封缝后荷载进行计算。

3 施工宽缝对整体式闸室底板内力影响分析

一般情况下, 检修和完建工况为整体式闸室结构内力控制工况, 本文选择以上两种工况进行计算分析。完建工况考虑结构自身重力、边载和土压力; 检修工况考虑结构自身重力、边载、土压力、扬压力和墙后水压力。

3.1 施工宽缝位置对闸室底板内力影响分析

取宽缝与边墙的距离 L 为 3~17 m 进行计算。闸室结构应力云图见图 4。底板跨中和边墙根部弯矩随宽缝位置变化曲线, 见图 5。弯矩以向上弯曲为负, 向下弯曲为正。

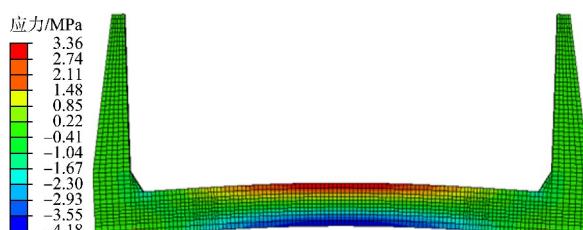


图 4 闸室结构应力云图

Fig. 4 Structural stress cloud map of lock chamber

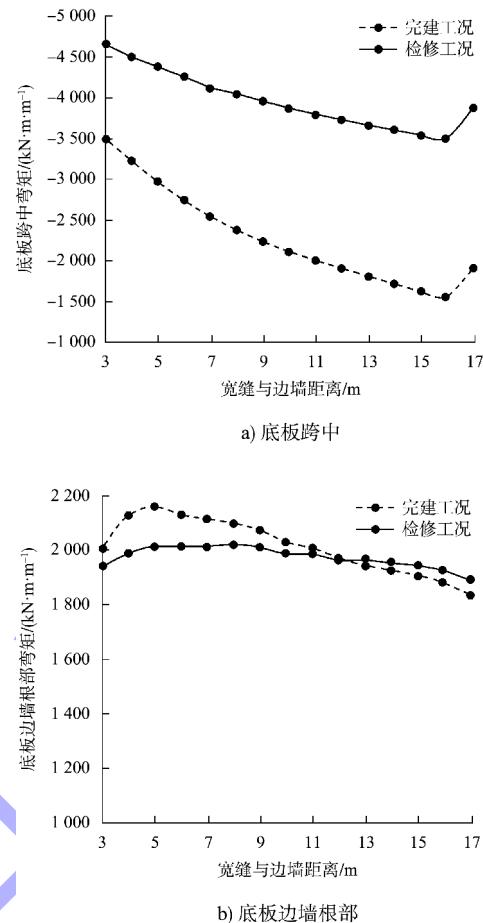


图 5 不同宽缝位置的闸室底板弯矩

Fig. 5 Bending moment of lock chamber bottom plate at different wide joint positions

由图 5 可知, 底板跨中负弯矩随宽缝与边墙距离 L 的增大而减小; 底板边墙根部正弯矩随 L 增大先微增后再减小。对于跨中负弯矩, 可将宽缝以外的边墙及填土视为中底板的边载, L 越大, 中底板受其影响也越大, 这部分影响由封缝前底板变形抵消, 因而封缝后完整荷载产生的跨中弯矩越小; 当 $L=17$ m 时, 2 道宽缝在闸室中心合并为 1 道宽缝, 又导致弯矩突然增大, 但增幅较小。对于边墙根部正弯矩, L 越大, 边底板范围越大, 边底板受封缝前荷载影响也越大, 因而封缝后完整荷载产生的边墙根部弯矩也越小, 总体呈现随 L 增大而减小的趋势。

无宽缝与有宽缝的闸室底板弯矩对比见表 2。可以看出, 相比于不设宽缝, 设置宽缝时跨中负弯矩明显减小, 边墙根部正弯矩增加, 但边墙根部弯矩基数小, 增量不大。当宽缝与边墙的距离 L

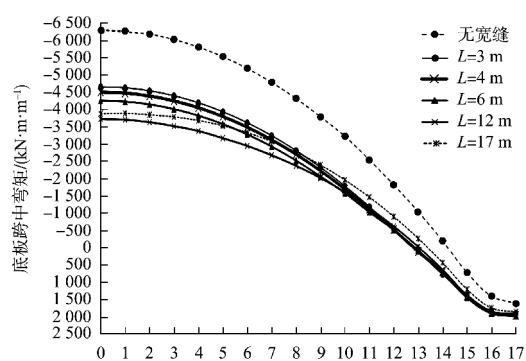
为3~17 m时, 相对无宽缝的情况, 跨中负弯矩在检修工况下减小26%~39%, 完建工况下减小32%~63%, L 越大, 减幅越大; 底板边墙根部正弯矩在检修工况下增大15%~18%, 完建工况下增大22%~33%, L 越大, 增幅越小。施工宽缝的作用实际是在施工期将整体式闸室分成3块, 分别为左边墙+边底板、中底板、右边墙+边底板, 在施工期完成部分变形后再连接成整体, 进而改善底板受力。在自身重力及封缝前边载作用下, 左、右边墙+底板产生变形但不传递弯矩, 从而减小底板跨中负弯矩。

表2 无宽缝与有宽缝的闸室底板弯矩对比

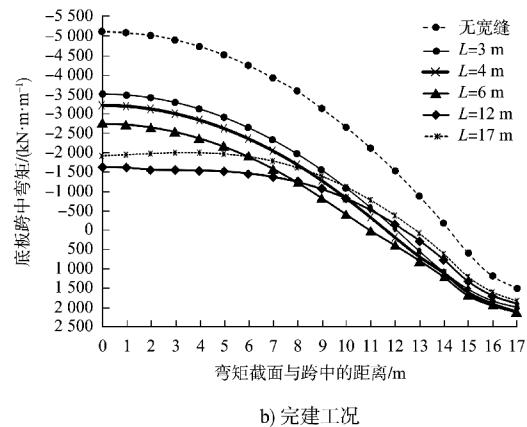
Tab. 2 Comparison of bending moments between lock chamber bottom plate without wide joints and those with wide joints kN·m·m⁻¹

宽缝与墙边 距离 L/m	检修工况		完建工况	
	跨中	边墙根部	跨中	边墙根部
无宽缝	-6 204	1 637	-5 116	1 508
3	-4 560	1 935	-3 504	2 000
4	-4 403	1 985	-3 214	2 121
6	-4 154	2 011	-2 738	2 127
12	-3 624	1 961	-1 897	1 968
17	-3 773	1 887	-1 910	1 834

无施工宽缝隙及施工宽缝与边墙距离 L 为3、4、6、12和17 m时, 两种工况下底板弯矩分布见图6。可以看出, 底板在跨中负弯矩最大, 在边墙根部正弯矩最大, 在距跨中11~13 m处弯矩接近于0, 零弯矩截面与边墙的距离约为闸室口宽的0.1~0.2倍。一般而言, 宜将宽缝布置在零弯矩附近, 此时宽缝顶、底面应力较小, 对结构受力有利。



a) 检修工况



b) 完建工况

图6 两种工况下闸室底板弯矩分布

Fig. 6 Distribution of bending moment on bottom plate of lock chamber under two conditions

不同宽缝位置时, 检修工况和完建工况闸室底板跨中、宽缝处和边墙根部应力的计算结果见表3。应力以拉应力为正, 压应力为负。

表3 两种工况不同宽缝位置时闸室底板应力

Tab. 3 Stress of bottom plate of lock chamber with different wide joint positions under two conditions

工况	宽缝与边墙 距离 L/m	跨中		宽缝处		边墙根部		MPa
		顶面	底面	顶面	底面	顶面	底面	
		无宽缝	3.36	-4.18	1.06	-1.95	-0.51	0.38
检修	3	2.41	-3.27	-0.86	0.04	-0.50	0.55	
	4	2.30	-3.09	-0.54	-0.31	-0.51	0.55	
	6	2.13	-2.95	0.14	-1.02	-0.49	0.57	
	12	1.80	-2.63	1.44	-2.31	-0.49	0.54	
	17	1.89	-2.71	1.89	-2.71	-0.51	0.50	
完建	无宽缝	2.82	-3.40	0.97	-1.60	-0.44	0.39	
	3	1.89	-2.40	-0.85	0.39	-1.61	0.88	
	4	1.72	-2.21	-0.66	0.20	-1.69	0.84	
	6	1.44	-1.91	-0.24	-0.20	-1.78	0.86	
	12	0.95	-1.37	0.64	-1.03	-1.65	0.73	
	17	0.97	-1.35	0.97	-1.35	-1.57	0.62	

由表3可知, 底板跨中应力值随宽缝位置 L 的增大而减小; 底板边墙根部应力值受宽缝位置 L 的影响较小。结合图6, 宽缝位置 L 为4~6 m时, 宽缝处弯矩接近于0, 顶、底面应力也较小, 本文后续分析中, 取 $L=6$ m。

3.2 封缝前填土高度对有宽缝闸室底板内力影响分析

$L=6$ m时, 改变封缝前填土高度进行内力计

算。封缝前边墙+边底板为重力式结构, 为满足结构抗滑、抗倾和地基承载力要求, 填土不能过高, 墙后填土高 9 m 时, 边墙结构计算结果: 抗滑稳定系数 K_c 为 1.25(允许值 1.20), 抗倾稳定系数 K_0 为 6.59(允许值 1.40), 基底应力最大值、最小值分别为 201、107 kPa。闸室内力计算取封缝前墙后填土高度 3~9 m 进行计算。

封缝前不同填土高度时, 闸室底板弯矩见表 4。可以看出, 底板跨中负弯矩随封缝前墙后填土高度的增加而减小; 底板边墙根部正弯矩随封缝前填土高度的增加而微增, 但增幅较小。对于跨中负弯矩, 由于封缝前填土高度越高, 边墙+边底板产生的变形就越大, 因而封缝后产生的跨中弯矩越小。当封缝前墙后填土高度由 3 m 增大到 9 m 时, 相对无施工宽缝的情况, 跨中负弯矩在检修工况下减小 18%~40%, 在完建工况下减小 26%~54%。

表 4 封缝前不同填土高度闸室底板弯矩

Tab. 4 Bending moment of lock chamber bottom plate at different filling heights before sealing

封缝前填土 高度/m	检修工况		完建工况		$\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$
	跨中	边墙根部	跨中	边墙根部	
无宽缝	-6 204	1 637	-5 116	1 508	
3	-5 066	1 863	-3 773	1 904	
5	-4 611	1 961	-3 240	2 022	
7	-4 154	2 011	-2 738	2 127	
9	-3 728	2 036	-2 346	2 143	

3.3 地基刚度对有宽缝闸室底板内力影响分析

由前述可知, 宽缝对底板边墙根部弯矩影响较小, 本文后续仅分析底板跨中负弯矩。不同地基刚度时, 闸室底板跨中负弯矩随地基弹性模量的变化曲线见图 7, 弯矩值见表 5。

表 5 不同地基弹性模量的闸室底板跨中弯矩

Tab. 5 Mid span bending moments of lock chamber bottom plate with foundation elasticity moduli

地基弹性 模量/MPa	检修工况			完建工况			$\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$
	无宽缝	有宽缝	变幅/%	无宽缝	有宽缝	变幅/%	
20	-6 938	-4 624	-33	-5 916	-3 053	-48	
40	-6 094	-4 154	-32	-5 116	-2 738	-46	
100	-4 554	-3 237	-29	-3 695	-2 142	-42	

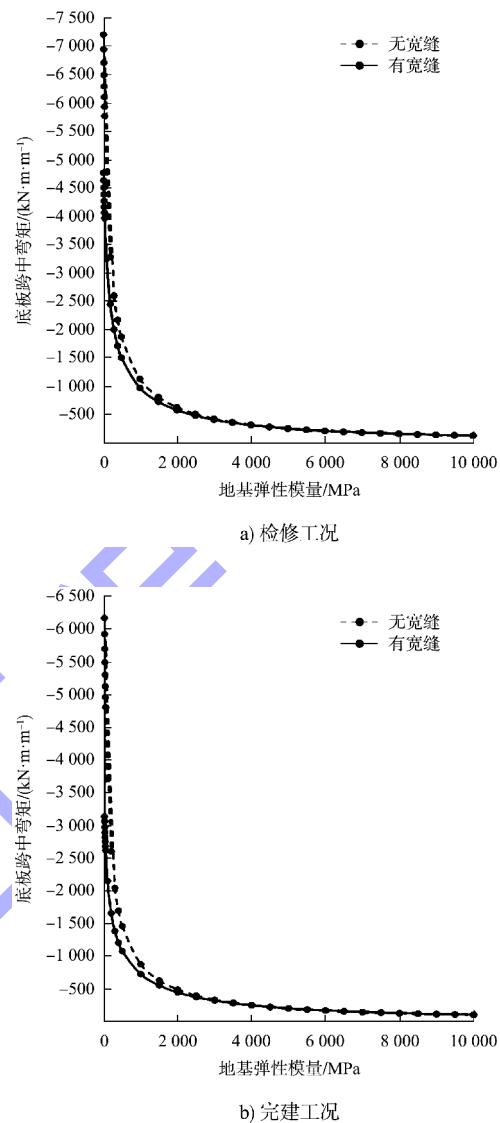


图 7 闸室底板跨中弯矩随地基弹性模量的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of mid span bending moment of lock chamber bottom plate with different foundation elasticity moduli

由图 7 可知, 底板跨中负弯矩随地基刚度增大而减小; 当地基刚度较小时, 设置宽缝能够减小弯矩; 当地基刚度较大时, 设置宽缝不改变弯矩。参考《工程地质手册》^[10], 土基弹性模量一般小于 100 MPa, 岩基弹性模量一般大于 10 GPa; 复合地基弹性模量一般稍大于土基。结合表 5 可知, 对于土基或复合地基, 设置宽缝能够显著减小跨中负弯矩, 地基刚度越小, 减幅越大; 对于岩基, 设置宽缝不改变弯矩, 可采用施工缝代替施工宽缝。

根据工程经验, 100 kPa 地承载力时(对应弹性模量 20 MPa), 设置宽缝可减小检修工况下跨中负弯矩 33%; 200 kPa 地基承载力时(对应弹性模量 40 MPa), 设置宽缝可减小检修工况下跨中负弯矩 32%。

3.4 桩基础对有宽缝闸室底板内力影响分析

地基分 2 层, 上层厚 8 m 为淤泥质粉质黏土, 密度 1.62 g/cm³, 弹性模量 6 MPa。底板底设置直径 1m 灌注桩基础, 桩长 18 m, 桩基在边墙以下横向桩间距 3.0 m, 在中底板以下横向桩间距 4.5 m, 纵向桩间距 4.0 m。闸室、桩基有限元模型见图 8。

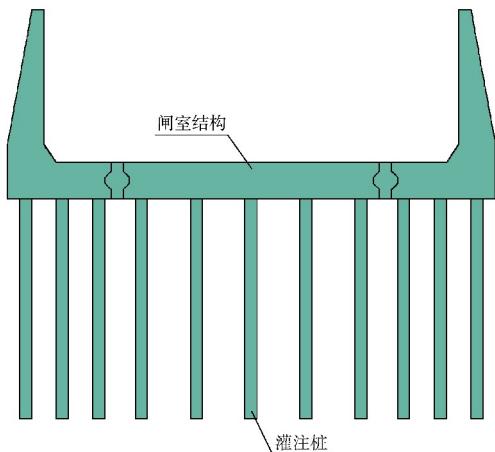


图 8 闸室、桩基有限元模型

Fig. 8 Finite element model of lock chamber and pile foundation

检修和完建工况下, 桩基础闸室底板跨中弯矩分布见图 9。可以看出, 对桩基础闸室, 设置宽缝依然能够明显减小底板弯矩。底板弯矩分布的形态与土基类似, 这是由于对于闸室这种大体积混凝土结构, 桩基尺寸远小于上部结构, 底板不仅作用在桩上, 也作用在土上, 考虑桩土相互作用, 桩与土作为一个整体, 类似于复合地基, 桩的作用更偏向于增强地基刚度, 而不是对底板施加约束。

下层地基弹性模量为 20、40 MPa 时, 检修、完建工况下底板跨中弯矩见表 6。可以看出, 弹性模量为 20 MPa 时(对应地基承载力 100 kPa), 设置

宽缝可减小检修工况下跨中负弯矩 41%; 弹性模量 40 MPa 时(对应地基承载力 200 kPa), 设置宽缝可减小检修工况下跨中负弯矩 45%。

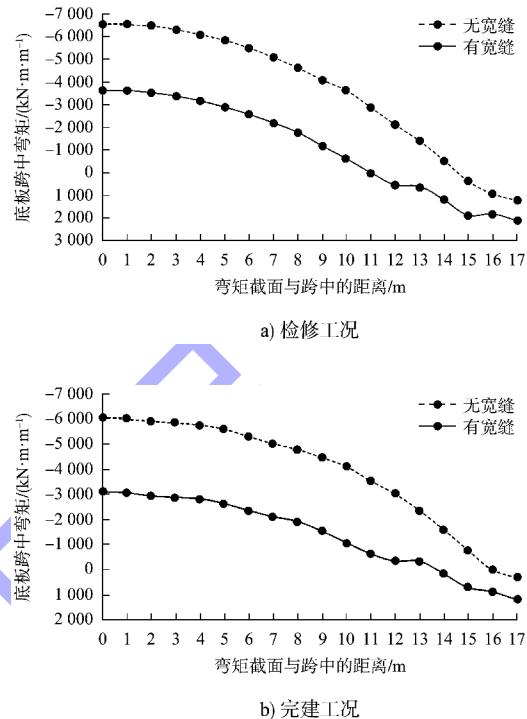


图 9 两种工况下桩基础闸室底板跨中弯矩分布

Fig. 9 Mid span bending moment distribution of lock chamber bottom plate with pile foundation under two conditions

表 6 不同下层地基弹性模量的闸室底板跨中弯矩

Tab. 6 Mid span bending moment of lock chamber bottom plate with different lower foundation elasticity moduli

下层地基弹性模量/MPa	检修工况			完建工况		
	无宽缝	有宽缝	变幅/%	无宽缝	有宽缝	变幅/%
20	-7 698	-4 518	-41	-7 388	-4 240	-43
40	-6 540	-3 615	-45	-6 033	-3 055	-49

4 结论

1) 整体式闸室底板施工宽缝的位置影响底板跨中弯矩。跨中弯矩随施工宽缝与边墙距离 L 的增大而减小。

2) 封缝前墙后填土高度影响底板跨中弯矩。跨中弯矩随填土高度的增大而减小。但要保证填土高度满足边墙抗滑、抗倾和地基承载力的要求。

3) 地基刚度影响有施工宽缝的整体式闸室底板跨中弯矩。地基刚度较小时(对应土基或复合地基), 设置施工宽缝能显著减小底板跨中弯矩; 地基刚度较大时(对应岩基), 设置施工宽缝不影响底板跨中弯矩。

4) 桩基础影响有施工宽缝的整体式闸室底板跨中弯矩。桩基的作用与复合地基类似, 设置施工宽缝能够明显减小底板跨中弯矩。

5) 对于土基、复合地基及桩基础, 宜将施工宽缝对称布置在距离边墙 0.1~0.2 倍闸室口宽处, 该处弯矩接近于 0、应力值也较小; 对于岩基, 施工宽缝不影响底板内力, 可采用施工缝代替施工宽缝。

参考文献:

- [1] 王作高. 船闸设计 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992: 251-252.
WANG Z G. Ship lock design [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1992: 251-252.
- [2] 丁希雅. 船闸闸室混凝土温度应力及施工宽缝布置优化分析 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
DING X Y. Optimization analysis of concrete temperature stress and construction wide joints arrangement in the lock chamber of ship locks [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [3] 徐闪. 沂北船闸底板宽缝封缝条件分析 [J]. 现代交通技术, 2011(8): 161-163.
XU S. Sealing condition analysis of bottom plate wide joint of Yibei ship lock [J]. Modern transportation technology, 2011, 8(S1): 161-163.
- [4] 李成, 杨旭, 徐昕, 等. 施工宽缝对整体式闸首底板的受力影响研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(2): 193-197.
LI C, YANG X, XU X, et al. Influence of construction wide joint on stress of integral lock head's floor [J]. Journal of water resources and water engineering, 2016, 27(2): 193-197.
- [5] 杨旭, 宁庆臣. 整体式闸首底板施工宽缝位置及合缝时间对底板的受力影响 [J]. 水运工程, 2024(8): 323-328.
YANG X, NING Q C. Influence of position and jointing time of wide construction joints on stress of integral lock head bottom plate [J]. Port & waterway engineering, 2024(8): 323-328.
- [6] 刘江林, 王平, 陈恩旺. 考虑施工过程的闸室底板内力计算分析 [J]. 港工技术, 2018, 55(3): 58-62.
LIU J L, WANG P, CHEN E W. Analysis of internal force calculation of lock chamber bottom plate based on construction procedure [J]. Port engineering technology, 2018, 55(3): 58-62.
- [7] 詹世富, 蔡志长. 航道工程学(II) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 147-148.
ZHAN S F, CAI Z C. Waterway engineering science(II) [M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 147-148.
- [8] 船闸水工建筑物设计规范: JTJ 307—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Code for design of hydraulic structures of shiplocks: JTJ 307-2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [9] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 298-299.
FEI K, ZHANG J W. Application of ABAQUS in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010: 298-299.
- [10] 常士骠, 张苏民, 工程地质手册 [M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 159, 169.
CHANG S P, ZHANG S M. Engineering geology handbook [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 159, 169.

(本文编辑 王璁)