



基于修正摩尔库仑本构预留宽缝 对闸室底板内力影响的研究

王智海, 王曙光

(山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 随着船舶大型化和标准化, 适应水头大、闸墙高的整体式闸室得到广泛应用。基于修正摩尔库仑本构探究预留宽缝对整体式闸室底板内力的影响, 以关桥船闸为例, 利用 Midas GTS NX 对闸室内力进行有限元分析。计算结果表明: 1) 修正摩尔库仑本构较 Drucker-Prager 本构在描述土体变形方面更具有优势; 2) 较无宽缝, 预留宽缝可明显降低底板跨中负弯矩; 3) 合缝时间越晚, 底板的最大负弯矩越小; 4) 综合考虑底板内力和闸墙稳定性, 当墙后回填至高程 35.5 m 时, 关桥船闸闸室底板应进行宽缝合缝; 5) 完建期和运行期, 预留宽缝的闸室底板最大正、负弯矩分别发生在完建工况和检修工况, 基底最大、最小应力分别发生在水运用工况和检修工况。

关键词: 整体式闸室; 预留宽缝; 修正摩尔库仑; 合缝时间; 底板内力

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0117-06

Influence of reserved wide joint on internal forces of chamber baseplate based on modified Mohr Coulomb model

WANG Zhihai, WANG Shuguang

(Shandong Province Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: With the upsizing and standardization of ships, the integral lock chamber which is suitable for high water head and high lock wall has been widely used. To explore the influence of the reserved wide joint on the internal force of the baseplate of the integral lock chamber, based on modified Mohr Coulomb model, this paper uses Midas GTS NX to perform finite element analysis of Guanqiao lock chamber. The results show that: 1) The modified Mohr Coulomb Model has more advantages in describing soil deformation than Drucker Prager model. 2) Compared with the absence of wide joint, the reserved wide joint can significantly reduce the hogging moment in the midspan of the baseplate. 3) The later the time of closing joint is, the smaller the maximum of the hogging moment of the baseplate becomes. 4) Considering the internal forces of the baseplate and the stability of the lock wall, when the level of the backfill soil behind the lock wall reaches the elevation of 35.5 m, the baseplate of Guanqiao lock chamber should fill the reserved wide joint. 5) During completion and operation periods, the maximum of the sagging moment and hogging moment of the baseplate with reserved wide joint occur under the conditions of the completion and maintenance respectively, and the maximum and minimum of the foundation stress occur under the conditions of the high-water-level operation and maintenance respectively.

Keywords: integral lock chamber; reserved wide joint; modified Mohr Coulomb model; time of closing joint; internal forces of baseplate

收稿日期: 2023-11-27

作者简介: 王智海 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事通航建筑物研究。

随着船舶大型化和标准化，内河航道不断挖深扩宽，适应水头大、闸墙高的整体式闸室得到广泛应用。由于受到闸墙自重力和边载的作用，整体式闸室的底板于跨中位置会产生较大负弯矩，并可能引起底板开裂，危害结构安全。为减轻不利影响，提出了“墩底分浇、预留宽缝、后期合缝”^[1]的施工方法。

为了探究预留宽缝对闸室底板受力的影响，国内许多学者进行了研究。周清华等^[2]、冯大江^[3]将 Duncan & Chang 双曲线本构(简称“D-C 本构”)和 Biot 固结理论结合，对土基固结沉降特性及其对分缝底板内力的影响进行研究。曹周洪^[4]、李成等^[5]应用 Drucker-Prager 本构(简称“D-P 本构”)，论证了施工宽缝对整体式底板受力的影响。

目前，较多研究的土体本构采用理想弹塑性本构(如 D-P 本构)，不能较好地反映土体的实际变形及硬化、剪胀等性质，进而可能影响计算结果的准确性。修正摩尔库仑本构(Modified Mohr Coulomb Model, MMC 本构)是基于摩尔库仑本构改善的各向同性的硬化弹塑性本构，可描述多种土

类的破坏和变形行为。与理想弹塑性本构相比，MMC 本构在主应力空间中的屈服面随塑性应变发生变化，同时考虑剪切硬化和压缩硬化。因此，本文基于 MMC 本构，以关桥船闸为例，分析预留宽缝对闸室底板内力的影响。

1 工程概况

关桥船闸位于菏泽市巨野县关庄南侧，按 II 级船闸标准建设，由上闸首、闸室、下闸首及上下游引航道组成。闸室采用整体式结构，有效尺寸 230.0 m×23.0 m×5.0 m(长×宽×门槛水深)。闸室结构断面见图 1，底板和闸墙均为大体积 C25 钢筋混凝土结构。底板顶高程 27.80 m，厚 2.80 m；闸墙顶高程 42.20 m，厚 1.0~3.8 m。关桥船闸上游最高通航水位 40.30 m，最低通航水位 38.50 m；下游最高通航水位 37.71 m，最低通航水位 32.80 m。闸墙后设排水管，排水管高程 33.60 m。地勘揭示，闸墙顶以下土层依次为②₁ 粉土、③₂ 粉土、④₂ 粉质黏土、④粉土、⑤粉质黏土、⑤₁ 粉土和⑥粉质黏土。

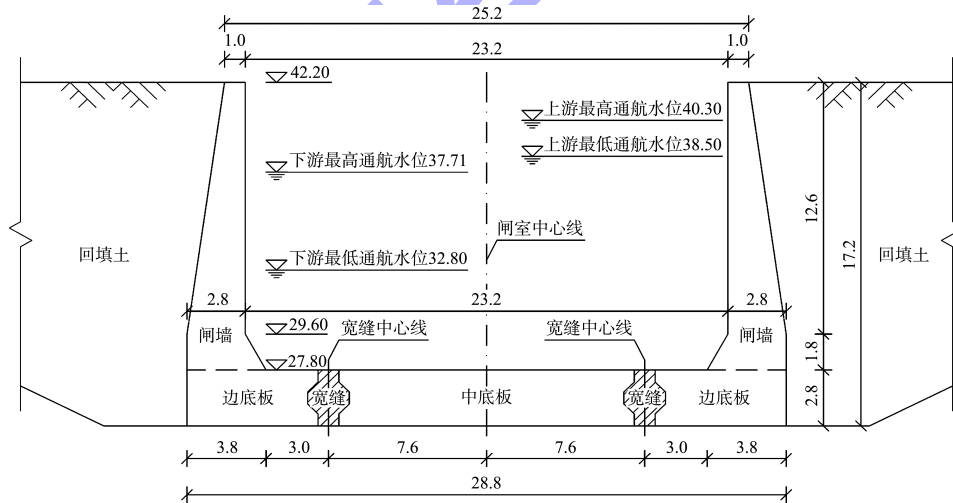


图 1 关桥船闸闸室断面 (单位: m)

2 计算模型

由于关桥船闸闸室的地基、荷载和断面尺寸变化不大，本文基于 Midas GTS NX，选择代表性断面按平面应变问题进行闸室有限元分析。闸室按轴对称结构建立有限元模型，见图 2。考虑到边界效应，模型高度为闸室高度的 3 倍，模型宽度为闸室宽度

的 5 倍。模型采用四边形网格为主的混合网格，网格尺寸 0.20~1.20 m，包含 4.497 4 万个节点和 4.468 9 万个单元。模型采用位移边界条件，底部设置固定约束，顶部设置自由边界，两侧分别设置水平约束和对称约束。模型设置库仑摩擦界面以模拟闸室与回填土、地基土之间的相互作用。

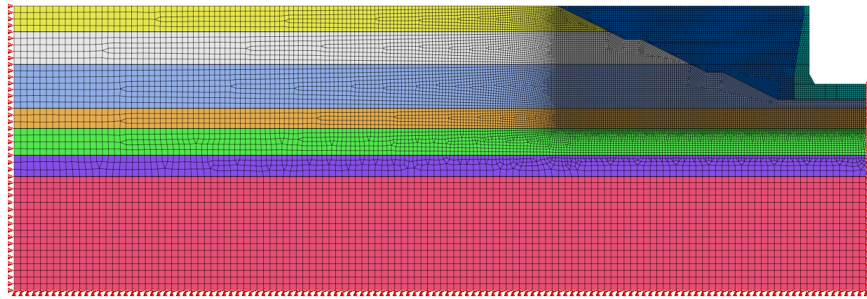


图 2 关桥船闸闸室有限元模型

闸室混凝土强度等级为 C25, 采用线弹性本构, 密度 ρ 为 2.50 t/m^3 , 弹性模量 E 为 28 GPa , 泊松比 ν 为 0.167 。

3 土体本构的选择

分别对 DP 本构和 MMC 本构下的闸室基坑开挖进行有限元仿真, 通过对比基坑的坑底回弹量论述两者在描述土体变形方面的优越性。

DP 本构共有 5 个参数, 包括 3 个控制塑性行为参数, 分别为有效黏聚力 c' 、有效内摩擦角 φ' 、剪胀角 ψ ; 2 个控制弹性行为参数, 分别为 E 和 ν 。各土层的 DP 本构参数取值见表 1。

MMC 本构共有 11 个参数, 包括 3 个控制塑性行为参数, 分别为 c' 、 φ' 、 ψ ; 4 个刚度参数, 分别为三轴排水试验的参考割线刚度 E_{30}^{ref} 、固结试验

的参考切线刚度 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 、卸荷再加荷模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、刚度应力水平相关幂指数 m ; 4 个高级参数, 分别为 ν 、参考应力 p^{ref} 、破坏比 R_f 、正常固结条件下的侧压力系数 K_0 。各土层 MMC 本构参数取值见表 2^[6-10]。

表 1 各土层 DP 本构参数取值

地层名称	层底高程/m	$\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	c'/kPa	$\varphi'/(\text{°})$	$\psi/(\text{°})$	E/MPa	ν
② ₁ 粉土	37.50	18.8	35.1	15.0	0	20.19	0.35
③ ₂ 粉土	31.50	19.0	30.7	13.7	0	18.15	0.35
④ ₂ 粉质黏土	23.50	19.5	39.7	14.7	0	17.31	0.35
④粉土	19.80	19.6	40.0	14.4	0	22.20	0.35
⑤粉质黏土	14.90	19.7	39.7	14.9	0	18.84	0.35
⑤ ₁ 粉土	11.00	20.1	30.5	16.4	0	23.04	0.35
⑥粉质黏土	-9.90	19.9	40.4	15.1	0	19.29	0.35
回填土	-	16.7	29.1	24.1	0	20.83	0.35

表 2 各土层 MMC 本构参数取值

地层名称	层底高程/m	$\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	c'/kPa	$\varphi'/(\text{°})$	$\psi/(\text{°})$	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{30}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	m	ν	$p^{\text{ref}}/\text{kPa}$	R_f	K_0
② ₁ 粉土	37.50	18.8	35.1	15.0	0	6.06	7.27	36.34	0.8	0.35	100	0.9	0.74
③ ₂ 粉土	31.50	19.0	30.7	13.7	0	5.45	6.53	32.67	0.8	0.35	100	0.9	0.76
④ ₂ 粉质黏土	23.50	19.5	39.7	14.7	0	5.19	6.23	31.16	0.8	0.35	100	0.9	0.75
④粉土	19.80	19.6	40.0	14.4	0	6.66	7.99	39.96	0.8	0.35	100	0.9	0.75
⑤粉质黏土	14.90	19.7	39.7	14.9	0	5.65	6.78	33.91	0.8	0.35	100	0.9	0.74
⑤ ₁ 粉土	11.00	20.1	30.5	16.4	0	6.91	8.29	41.47	0.8	0.35	100	0.9	0.72
⑥粉质黏土	-9.90	19.9	40.4	15.1	0	5.79	6.94	34.72	0.8	0.35	100	0.9	0.74
回填土	-	16.7	29.1	24.1	0	6.25	7.50	37.50	0.8	0.35	100	0.9	0.59

图 3 为 DP 本构和 MMC 本构下闸室基坑的坑底回弹量。由图可知, 开挖后 DP 本构计算的坑底最大回弹量 324 mm , 为开挖深度的 2.89% , 远大于回弹量的常见估算值^[11]; MMC 本构计算的坑底最大回弹量仅为 112 mm , 为开挖深度的 0.65% ,

符合回弹量的常见估算值。DP 本构由于没有考虑应力路径的影响, 卸荷模量和加荷模量相同, 导致计算的坑底回弹量很大, 与工程经验不符; MMC 本构分别设置卸荷模量和加荷模量, 前者远大于后者, 计算的坑底回弹量与工程经验相符。

其他研究^[12-13]也表明,硬化土类的弹塑性本构较理想的弹塑性本构能给出更加合理的土体变形。结合前文分析结果和其他学者的研究成果,本文认为,在进行整体式闸室有限元分析时,MMC本构比DP本构更具有优势。

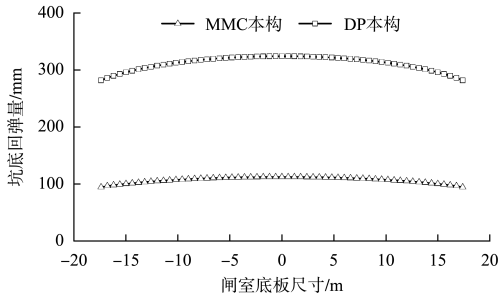


图3 DP本构和MMC本构下闸室基坑的坑底回弹量

4 有无宽缝对闸室底板内力的影响

为探究宽缝对闸室底板内力的影响,以完工工况(墙前无水,墙后水位平闸底板底高程25.0 m)为例,基于MMC本构,分别对无宽缝和预留宽缝的闸室进行有限元分析。无宽缝时,按照初始应力平衡、基坑降水和开挖、底板整体浇筑、闸墙浇筑、墙后回填至闸墙顶的施工顺序进行仿真;预留施工宽缝时,按照初始应力平衡、基坑降水和开挖、底板预留宽缝浇筑、闸墙浇筑、墙后回填至高程35.5 m、宽缝合缝、墙后回填至闸墙顶的施工顺序进行仿真。

图4为无宽缝和预留宽缝时闸室地基的竖向位移。由图可知,无宽缝时,底板整体浇筑,地基竖向位移呈抛物线形分布,竖向位移差为17.4 mm。预留宽缝时,宽缝两侧底板地基竖向位移有明显突变现象,边底板地基竖向位移近似梯形分布,竖向位移差为25.6 mm;中底板地基竖向位移均匀,近似矩形分布。

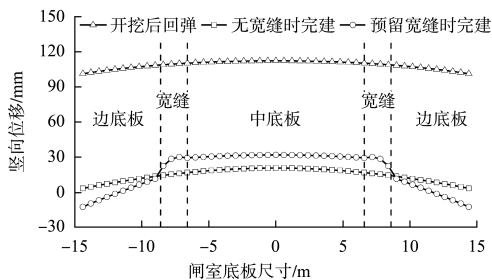


图4 无宽缝和预留宽缝时闸室地基的竖向位移

根据式(1)内力与应力的关系:

$$M = \int_A y\sigma dA \quad (1)$$

式中: M 为截面弯矩, A 为截面面积, y 为微分单元到截面中性轴的距离, σ 为微分单元处正应力。采用Python语言编写内力计算程序,计算求得完工工况下无宽缝和预留宽缝的闸室底板弯矩分布,见图5。

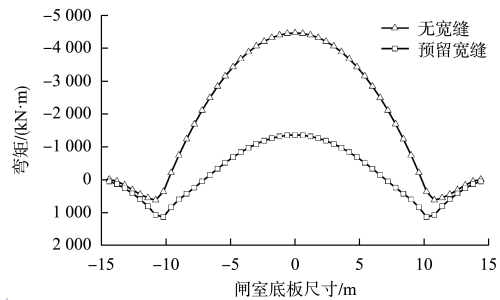


图5 无宽缝和预留宽缝的闸室底板弯矩

由图5可知,无宽缝和预留宽缝的底板均呈现“支座正弯矩,跨中负弯矩”的分布规律。无宽缝时,底板最大正弯矩642 kN·m远小于最大负弯矩4 466 kN·m;预留宽缝时,底板最大正、负弯矩接近,分别为1 243和1 362 kN·m。由此可见,较无宽缝,预留宽缝可明显增大底板正弯矩,降低底板负弯矩。这是因为预留宽缝的边底板地基竖向位移差大于无宽缝的,而中地板竖向位移差则相反。

5 宽缝合缝时间分析

宽缝合缝时间需统筹考虑结构强度和稳定性,最大化发挥“墩底分浇、预留宽缝、后期合缝”的效益。本文基于MMC本构,分别按墙后回填至31.5、33.5、35.5、37.5 m时进行宽缝合缝,对底板内力和闸墙抗滑、抗倾覆稳定进行计算,探究最佳合缝时间。

图6为不同合缝时间完工工况下的闸室底板弯矩分布。由图可知,最大正弯矩均位于闸墙内边缘截面,最大负弯矩位于跨中截面。随着合缝前墙后回填土高程增加,最大正弯矩增大,但幅度较小;最大负弯矩则显著减小,且与合缝前回填高程成负线性相关,即合缝前回填高程每增加2 m,

最大负弯矩减小约 520 kN·m。当合缝前墙后回填至 35.50 m 时,底板最大正、负弯矩接近,分别为 1 243 和 1 362 kN·m,结构受力合理。

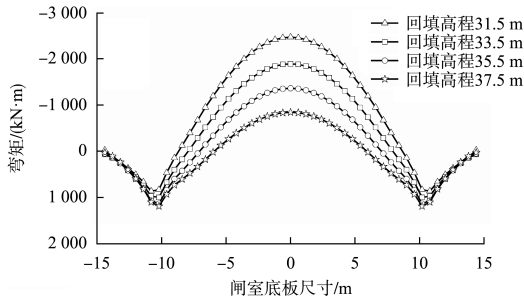


图6 不同合缝时间完建工况下闸室底板弯矩

依据 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》^[14]相关条款,对合缝前闸墙的抗滑稳定和抗倾覆稳定进行计算,结果见表 3。由表可知,合缝时间越晚,闸墙的抗滑稳定性和抗倾覆稳定性越差;当合缝前回填至 37.5 m 合缝时,闸墙的抗滑稳定安全系数为 1.06,已不满足规范要求的 1.20。综合考虑底板内力和闸墙稳定性,当墙后回填至 35.5 m 时,关桥船闸闸室应进行宽缝合缝。

表3 合缝前闸墙抗滑稳定和抗倾覆稳定计算结果

合缝前回填土 高程/m	抗倾覆稳定安全系数		抗滑稳定安全系数	
	计算值	允许值	计算值	允许值
31.5	23.23	1.40	3.70	1.20
33.5	10.57	1.40	2.19	1.20
35.5	5.77	1.40	1.46	1.20
37.5	3.55	1.40	1.06	1.20

6 预留宽缝底板内力分析

根据前文的计算结果,基于 MMC 本构对预留宽缝的闸室底板内力进行有限元分析。计算工况包括完建工况、高水运用工况、低水运用工况和检修工况,各工况水位组合为:1) 完建工况:墙前无水,墙后水位平闸室底高程 25.0 m;2) 高水运用工况:墙前水位为上游最高通航水位 40.3 m,墙后水位为排水管高程 33.6 m;3) 低水运用工况:墙前水位为下游最低通航水位 32.8 m,墙后水位为排水管高程 33.6 m;4) 检修工况:墙前无水,墙后水位为排水管高程 33.6 m。

图 7 为计算工况下闸室底板弯矩分布。由图可知,高水运用工况下,底板全部承受负弯矩;

其余工况下,底板呈现“支座正弯矩,跨中负弯矩”的分布规律。最大正弯矩发生在完建工况,为 1 244 kN·m;最大负弯矩发生在检修工况,为 2 963 kN·m。

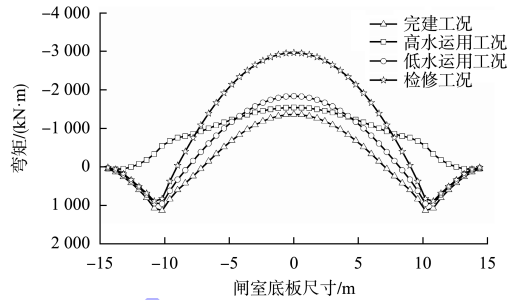


图7 计算工况下预留宽缝底板弯矩

图 8 为计算工况下基底应力分布。由图可知,宽缝两侧的基底应力有明显突变现象,基底应力在边底板处最大、中底板处次之、宽缝处最小。边底板、宽缝和中底板的最大基底应力均发生在高水运用工况,分别为 350、89 和 144 kPa;边底板、宽缝和中底板的最小基底应力均发生在检修工况,分别为 103、42 和 62 kPa。

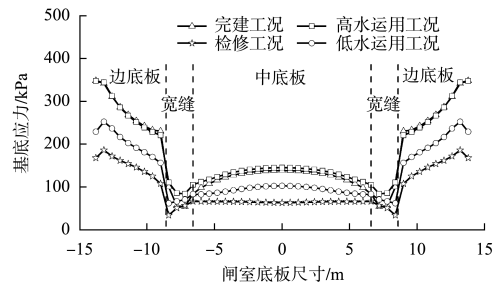


图8 计算工况下基底应力分布

7 结论

1) 通过对比分析闸室基坑的坑底回弹量,MMC 本构比 DP 本构更能合理反映土体的实际变形。

2) 未预留宽缝时,闸室底板跨中将产生较大的负弯矩;预留宽缝时,由于合缝前闸墙自重力和边载对地基产生预压固结效果,闸室底板跨中负弯矩显著降低。

3) 宽缝合缝时间越晚,闸室底板最大负弯矩越小,但闸室抗滑稳定性和抗倾覆稳定性越差。综合考虑底板内力和闸墙稳定性,当墙后回填至

35.5 m 时, 关桥船闸闸室底板应进行宽缝合缝。

4) 在完建期和运行期, 闸室底板最大正、负弯矩分别发生在完建工况和检修工况; 基底最大、最小应力分别发生在高水运用工况和检修工况。

5) 本文未考虑施工过程中水化热温升的影响, 下一步将以此为重点, 分析预留宽缝叠加水化热温升对闸室底板内力的影响。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 曹周红. 不同施工过程对坞式船闸结构影响的仿真模拟研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2005.

[5] 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.

[6] 孙利成. 基于修正摩尔库伦模型的深基坑数值分析及变形预测研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2021.

[7] 胡建林, 孙利成, 崔宏环, 等. 修正摩尔库伦模型下的深基坑变形数值分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 134-140.

[8] 周恩平. 考虑小应变的硬化土本构模型在基坑变形分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[9] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.

[10] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269-278.

[11] 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.

[12] POTTS D M, ZDRAVKOVIC L. Finite element analysis in geotechnical engineering: application [M]. London: Thomas Telford, 2001.

[13] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 258-264, 326.

[14] 中交水运规划设计院有限公司. 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.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 92 页)

[12] 李家世, 刘晓帆. 梯级水库建设对岷江下游航道通航流量的影响[J]. 水运工程, 2021, (6): 164-170, 193.

[13] 李明, 胡春宏. 三峡工程运用后坝下游分汉型河道演变与调整机理研究[J]. 泥沙研究, 2017, 42(6): 1-7.

[14] 付中敏, 闫军, 刘怀汉. 长江中游监利河段河床演变与航道整治思路[J]. 水运工程, 2010(6): 100-107.

[15] 刘林双, 李明, 郑力. 长江中下游砂卵石分汉河段演变机理[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(3): 346-353, 394.

[16] LI S Z, YANG Y P, ZHANG M J, et al. Coarse and fine sediment transportation patterns and causes downstream of the Three Gorges Dam[J]. Frontiers of earth science, 2018, 12(4): 750-764.

[17] 游强强, 刘洪春, 徐果, 等. 三峡蓄水后芦家河河道沙泓进口浅滩演变特征及其对航道条件的影响[J]. 水

运工程, 2014(12): 130-134.

[18] 王延贵, 陈康, 陈吟. 水系连通机理及其影响因素[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(2): 191-200.

[19] 胡茂银, 李义天, 朱博渊, 等. 荆江三口分流分沙变化对干流河道冲淤的影响[J]. 泥沙研究, 2016(4): 68-73.

[20] 周建银, 高菲, 元媛, 等. 三峡水库运行前后长江中下游干流及两湖的径流过程变化[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 696-708.

[21] 陈立德. 长江中游荆江和江汉: 洞庭地区防洪减灾策略[J]. 科技导报, 2018, 36(15): 85-92.

[22] 董正法, 黄蓓蓓, 李明, 等. 长江中游芦家河水道维护性疏浚技术[J]. 水运工程, 2020(1): 90-96.

[23] 杨传华, 黄蓓蓓, 李明, 等. 长江中游太平口水道维护性疏浚技术[J]. 水运工程, 2019(11): 100-106, 117.

(本文编辑 王传瑜)