

江苏省某尾水控制闸工程安全复核计算分析

赵苗苗¹ 陆泽林¹ 刘豹²

1 苏州市水利设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215000

2 苏州市相城区漕湖街道建设管理办公室, 江苏 苏州 215000

[摘要] 水工建筑物安全鉴定由现状调查分析评价、安全监测分析与质量评价、安全复核分析评价以及安全综合评价等部分组成, 安全复核分析评价是水闸安全鉴定的重要内容。文中基于江苏省某控制闸的设计资料及现状问题, 对水闸建筑物、闸门与启闭机进行现场安全检测, 同时对其主体结构进行安全复核分析计算, 对该闸做出最切实际的评定, 进而提出针对性的改造方案, 为水闸工程的除险加固提供依据。同时, 文中的复核计算过程可为今后的水闸安全鉴定工作提供经验与借鉴。

[关键词] 水闸工程; 安全鉴定; 复核计算; 分析评价

DOI: 10.33142/hst.v7i1.11198

中图分类号: TV66

文献标识码: A

Analysis of Safety Review Calculation for a Tailwater Control Sluice Project in Jiangsu Province

ZHAO Miaomiao¹, LU Zelin¹, LIU Bao²

1 Suzhou Water Conservancy Design and Research Institute Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215000, China

2 Suzhou Xiangcheng Caohu Street Construction Management Office, Suzhou, Jiangsu, 215000, China

Abstract: The safety appraisal of hydraulic structures consists of current situation investigation, analysis and evaluation, safety monitoring analysis and quality evaluation, safety review analysis and evaluation, and comprehensive safety evaluation. Safety review analysis and evaluation are important contents of water gate safety appraisal. Based on the design data and current issues of a control gate in Jiangsu Province, this article conducts on-site safety inspections on the water gate building, gate and hoist, and conducts safety review analysis and calculation on its main structure. The most practical evaluation of the gate is made, and targeted renovation plans are proposed to provide a basis for the risk elimination and reinforcement of the water gate project. Meanwhile, the review calculation process in the article can provide experience and reference for future safety appraisal work of water gates.

Keywords: sluice engineering; safety appraisal; review calculations; analysis and evaluation

引言

某尾水控制闸的主要作用是拦截由王庄闸下泄的污水, 使之逼入穿淮沭河口东西偏泓交叉口的尾水北地涵, 送至现北偏泓河下, 经叮当河河段北泓, 至小潮河段苓池河这条排污专道下泄入海。它的兴建对改善城市工业、生活用水的水质有着极其重要的效益。对某尾水控制闸建筑物、闸门与启闭机进行现场安全检测, 同时对控制闸主体结构进行安全复核分析计算, 对该闸做出最切实际的评定^[1], 为水闸工程的除险加固提供依据。因此有必要对某控制闸进行安全鉴定, 以保障该闸能够安全运行, 更好地发挥其工程效益^[2-3]。

1 工程概况

某尾水控制闸位于新沂河北偏泓上, 它与穿淮沭河东西偏泓交叉口的尾水北地涵一起组成蔷薇河送水枢纽工程, 其控制运用原则是: 某尾水控制闸正常为关闭挡水状态, 当新沂河行洪时, 某尾水控制闸闸门提至最高处。该闸采用钢筋混凝土开敞式结构, 闸身总宽度为 46.02m, 共 4 孔, 每孔净宽 10.0m。分两块底板, 每块底板均为 2 孔一联, 底板顶高程为 5.0m, 闸底板厚 1.2m, 闸室长 10.0m, 闸墩顶高程为 10.0m, 上游设 2 米宽工作便桥。排架顶高

程为 17.0m, 工作桥桥面高程为 18.0m。闸门为钢结构平面直升门, 采用 QPQ2*10 卷扬式启闭机, 闸门顶高程为 9.3m。上游设 10.0m 长钢筋砼护坦, 下有设 15.0m 长钢筋砼消力池。两岸上、下游翼墙均为浆砌块石重力式结构, 墙顶高程为 10.0m。工程主要技术参数见下表 1。

表 1 某控制闸工程主要技术参数表

设计流量 (m ³ /s)	150 (设计) 200 (校核)	建筑物等级	2 级
闸孔数	4	闸孔净高 (m)	5.0
闸室长 (m)	10.0	闸孔净宽 (m)	10
闸总宽 (m)	46.02	公路桥净宽 (m)	3
闸门结构型式	钢结构平板直升门	工作便桥净宽 (m)	2

2 工程安全复核

2.1 防洪标准复核

3.1.1 闸顶高程复核计算

由于水闸的主要建筑物级别为 2 级, 故对应的波列累积频率取 2%。闸墩顶部高程应根据挡水和泄水两种情况而定^[2]。该闸设计防洪水位为 9.0m, 设计闸顶高程计算得 10.139m, 某水闸实际闸墩顶高程是 10.0m, 故闸顶高程

稍显不足。

表2 水闸安全超高下限值表 (m)

计算情况	挡水	泄水
设计	0.5	1.0
校核	0.4	0.7

表3 闸墩高程计算表

计算情况	H (m)	h _{2s} (m)	h _z (m)	安全超高	闸墩高程
设计正向	9.0	0.524	0.115	0.5	10.139
校核正向	9.0	0.341	0.075	0.4	9.817
地震正向	9.0	0.341	0.075	0.4	9.817
设计反向	9.0	0.524	0.115	0.5	10.139
校核反向	9.0	0.341	0.075	0.4	9.817
地震反向	9.0	0.341	0.075	0.4	9.817
消能设计	8.2	0.501	0.110	1.0	9.811
消能校核	9.0	0.343	0.075	0.7	10.119

3.1.2 过流能力复核计算

该闸过流能力复核的水位组合见表4, 根据《水闸设计规范》SL265-2001, 过流能力计算方法如下^[4]:

$$Q = B_0 \sigma \epsilon m \sqrt{2g} H_0^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中: B_0 ——闸孔总净宽 (m);
 Q ——过闸流量 (m^3/s);
 H_0 ——计入行近流速水头的堰上水深 (m);
 g ——重力加速度, 取 $g=9.81 m/s^2$;
 m ——堰流流量系数;
 ϵ ——堰流侧收缩系数, 按《水闸设计规范》SL265-2001 公式(A.0.1-3) 计算求得;

σ ——堰流淹没系数, 按《水闸设计规范》SL265-2001 公式(A.0.1-6) 计算求得或按表 A.0.1-2 查得。

当堰流处于高淹没度 ($\frac{h_s}{H_0} \geq 0.9$) 时,

$$Q = B_0 \mu_0 h_s \sqrt{2g(H_0 - h_s)} \quad (2)$$

式中: μ_0 ——淹没堰流的综合流量系数, 按《水闸设计规范》SL265-2001 (A.0.2-2) 计算求得或由表 A.0.2 查得。

根据计算结果, 在各种工况下该闸过流能力满足要求。

表4 该闸工程过流能力计算成果表

计算工况	水位 (m)		闸孔总净宽 (m)	设计流量 (m^3/s)	计算流量 (m^3/s)
	闸上水位	闸下水位			
设计	8.2	8.1	40.0	150	192.7
校核	8.8	8.5	40.0	200	338.4

综上所述可知: 该闸过流能力满足要求, 闸顶高程稍显不足, 但该闸设计时允许河道行洪时漫顶, 所以, 该闸防洪标准满足要求, 评定为 A 级^[5]。

3.2 消能防冲复核

该闸采用下挖式消力池, 底流式消能, 消能复核计算成果见表5。

表5 该闸消能复核计算成果表

工况	流量 (m^3/s)	过闸单宽流量 (m^3/s)	消力池深度 d (m)		消力池长度 L _s (m)		消力池底板厚度 t (m)		海漫长度 (m)	
			计算	实际	计算	实际	计算	实际	计算	实际
设计	150	3.75	0.5	0.6	11.78	15.0	0.33	0.6	13.14	20
校核	200	5.0	0.5	0.6	13.82	15.0	0.42	0.6	16.59	20

由上表可知: 消力池的池深、消力池长度、消力池底板厚度、海漫长度均满足要求。即消能防冲满足标准要求, 评定为 A 级。

3.3 渗流安全复核

3.3.1 水位组合

该闸渗流复核计算水位组合见表6。渗流计算采用上下游水位差最大时的水位, 故取校核工况下的水位进行渗流计算。上下游侧水位为▽9.0m, 下游侧水位为▽7.5m, 水位差为 1.5m。

表6 该闸渗流复核计算水位组合表

计算情况	上游水位 (m)	下游水位 (m)
设计正向	9.0	8.1
校核正向	9.0	7.5
地震正向	9.0	8.1
设计反向	8.1	9.0
校核反向	7.5	9.0
地震反向	8.1	9.0

3.3.2 验算防渗长度

闸基地下轮廓布置如图1所示。该闸室闸基持力层为粘土, 根据规范允许渗径系数取3。

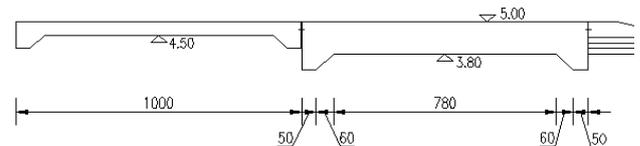


图1 闸室闸基地下轮廓布置示意图 (单位: 高程 m; 长度 cm)

运行情况其实际长度: $L_{实} = 22.81m$; $\Delta H = 1.5m$

$$C = \frac{L_{实}}{\Delta H} = 22.81/1.5 = 15.2 > [C] = 3 \quad (3)$$

故闸室闸基防渗长度满足要求。

3.3.3 闸室渗流计算

根据闸室地下轮廓的特点, 采用改进阻力系数法计算, 由图1可得到地下轮廓简化和分段, 具体布置见图2。

计算地基有效深度: $L_0 = 20m$; $S_0 = 1.8m$;

$$L_0 / S_0 = 20/1.8 = 11.11 > 5 \quad (4)$$

$$T_e = 0.5L_0 = 0.5 \times 20m = 10m \quad (5)$$

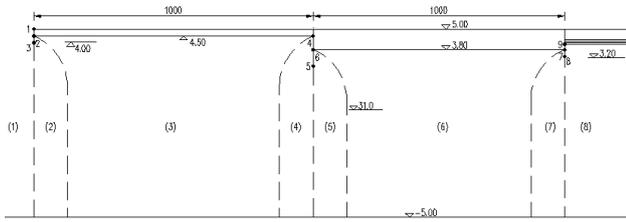


图2 闸室校核工况地下轮廓简化、分段布置图(单位: 高程 m; 长度 cm)

②计算各典型段的阻力系数

根据《水闸设计规范》SL265-2001, 各典型段阻力系数计算公式, 得到闸室各典型段的几何特征及阻力系数计算见表 7。

表 7 闸室各典型段阻力系数计算表

段号	段别	S (m)		T (m)	L (m)	ξ_i
(1)	进口段	1.0		10.0		0.488
(2)	垂直段	0.5		9.5		0.053
(3)	水平段	0.5	1.3	9.5	10.0	0.920
(4)	垂直段	1.3		9.5		0.138
(5)	垂直段	0.6		8.8		0.068
(6)	水平段	0.6	0.6	8.8	10.0	1.041
(7)	垂直段	0.6		8.8		0.068
(8)	出口段	0.4		8.6		0.456
	Σ					3.233

③各典型段渗压水头损失计算

各典型段渗压水头损失按公式 $h_i = \frac{\xi_i}{\sum \xi_i} \Delta H$ 计算, 各典型段末的渗压水头损失修正计算见下表。

表 8 闸室各典型段末渗压水头损失计算表 (m)

典型段	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	合计
水头损失	0.227	0.024	0.427	0.064	0.032	0.483	0.032	0.212	1.50

各典型段末的渗压水头损失修正成果见表 3.2.4。

表 9 闸室各典型段末渗压水头修正表 (m)

编号	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9
渗压水头	1.50	1.337	1.288	0.822	0.758	0.726	0.182	0.118	0

④校核工况下渗透坡降计算:

由于持力层为粘土, 取 $[J_0]=0.60 \sim 0.70$, $[J_x]=0.30 \sim 0.40$

$$\text{渗流出口处平均渗透坡降: } J_0 = \frac{0.118}{0.4} = 0.295 < [J_0]$$

$=0.60 \sim 0.70$

$$\text{水平段最大渗透坡降: } J_x = \frac{0.483}{10} = 0.0483 < [J_x]$$

$=0.30 \sim 0.40$ 。

故水平坡降、出口坡降均满足规范要求。

综上可知: 渗流安全满足标准要求, 运行正常, 评定为 A 级。

3.4 结构安全复核

3.4.1 闸室稳定复核计算

闸室结构计算简图见图 3。

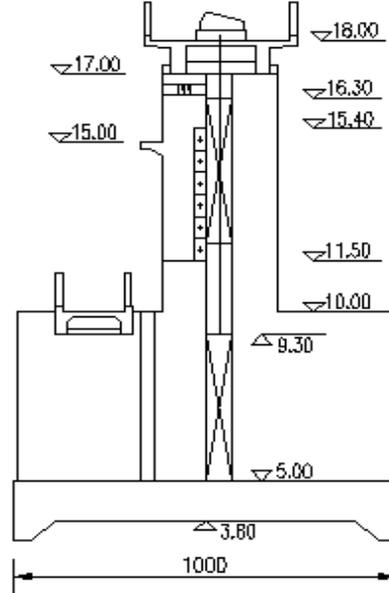


图 3 闸室结构简图 (单位: cm)

在各计算工况下该闸闸室的抗滑稳定安全系数、地基应力以及不均匀系数的复核计算成果见表 10。

表 10 闸室稳定复核计算成果表

计算工况	水位 (m)		地基应力 (kPa)			不均匀系数		抗滑稳定安全系数	
	$H_{上}$	$H_{下}$	p_{max}	p_{min}	p	η	$[\eta]$	K_c	$[K_c]$
设计正向	9.0	8.1	35.02	33.72	34.37	1.04	2.0	2.34	1.30
校核正向	9.0	7.5	36.86	35.69	36.27	1.03	2.5	1.91	1.15
地震正向	9.0	8.1	42.38	26.36	34.37	1.61	3.0	1.66	1.05
设计反向	8.1	9.0	41.65	26.29	33.97	1.58	2.0	2.35	1.30
校核反向	7.5	9.0	41.90	29.31	35.60	1.43	2.5	1.91	1.15
地震反向	8.1	9.0	49.00	18.94	33.97	2.59	3.0	1.66	1.05

从上表可知: 在各种计算工况下, 闸室抗滑稳定安全系数和地基应力不均匀系数都满足规范要求, 故评定为 A 级。闸室基底应力的最大值为 49.00kPa, 小于基底土的允许承载力值 300kPa, 故地基承载力满足要求, 评定为 A 级。

3.5 金属结构安全复核

3.5.1 闸门结构复核计算

(1) 闸门结构

闸门采用平面钢闸门, 为焊接式多主梁结构。钢闸门总高为 4.3m, 底高程为 $\nabla 5.0m$, 顶高程为 $\nabla 9.3m$ 。钢闸

门设计面板厚度为 10.0mm, 主梁腹板厚为 10.0mm, 上、下翼缘厚 16.0mm, 宽 250mm。采用 QPQ-2×10 吨卷扬式启闭机。

(2) 计算工况

由于校核工况时闸门受到的总水压力最大, 因此在此工况下对闸门的结构进行复核计算。上游水位为▽9.0 米, 下游水位为▽7.5 米, 闸门水压力分布图见图 4。

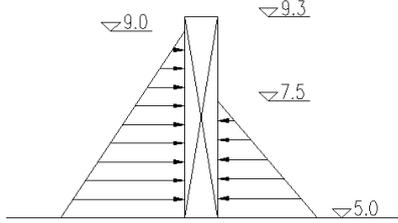


图 4 闸门水压力分布图 (单位: 高程 m)

闸门总水压力为:

$$P = 0.5 \times 9.81 \times (4.0^2 - 2.5^2) \times 10 = 478.24 \text{ kN} \quad (6)$$

3.5.1.1 主梁复核

(1) 主梁强度复核

闸门面板厚度取原设计与实际检测中较小值, 即取为 10mm 来进行复核计算。选择 3 号主梁进行复核计算, $l_0 = 0.8 \times 1750 = 1400 \text{ mm}$, $b = (800 + 800) / 2 = 800 \text{ mm}$, $l_0 / b = 1.75$, 查表得 $\xi = 0.64$, 面板兼做主梁翼缘的有效宽度按《水利水电工程钢闸门设计规范》计算。

$$B = \xi_1 b = 0.64 \times 800 = 512 \text{ mm} \quad (7)$$

$$B \leq 60\delta + b_f = 60 \times 10 + 65 = 665 \text{ mm} \quad (8)$$

取 $B = 512 \text{ mm}$ 来进行计算。主梁结构图见图 5。

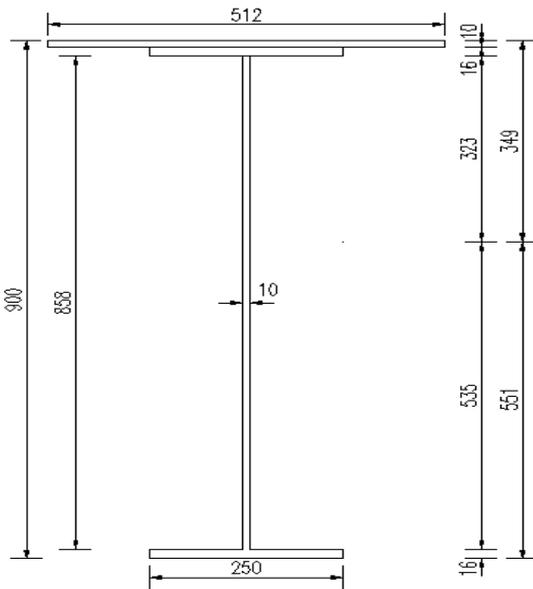


图 5 主梁结构图 (单位: 尺寸 mm)

经 CAD 查询得: $I = 2.85 \times 10^9 \text{ mm}^4$

$$q = \frac{P_{\text{总}}}{2 \times L_1} = \frac{478.24}{2 \times 10.12} = 47.26 \text{ kN/m}, \quad L_1 = 10.12 \text{ m}, \quad L = 10.0 \text{ m}$$

$$M = \frac{qL_1}{2} \left(\frac{L}{2} - \frac{L_1}{4} \right) = \frac{47.26 \times 10.12}{2} \left(\frac{10}{2} - \frac{10.12}{4} \right) = 590.66 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_1 = \frac{My_1}{I_x} = \frac{590.66 \times 10^6 \times 349}{2.85 \times 10^9} = 72.58 \text{ N/mm}^2 < 0.9[\sigma] = 144 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_2 = \frac{My_2}{I_x} = \frac{590.66 \times 10^6 \times 551}{2.85 \times 10^9} = 114.60 \text{ N/mm}^2 < 0.9[\sigma] = 144 \text{ N/mm}^2$$

计算表明: 闸门主梁强度满足要求。

(2) 主梁挠度复核

主梁挠度验算可将主梁视为在计算跨度内受均布水压力。受均布荷载的等截面简支梁, 其最大挠度按下式计算:

$$f_{\text{max}} = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{EI} = \frac{5 \times 47.26 \times 10120^4}{384 \times 2.06 \times 10^5 \times 2.85 \times 10^9} = 11.03 \text{ mm} < [f] = \frac{l_0}{750} = 13.49 \text{ mm}$$

计算表明: 主梁刚度满足规范要求。

3.5.1.2 面板复核

闸门面板按《水利水电工程钢闸门设计规范》附录 G 中式 (G1) 验算。经计算, 区格 IV 的长边中点应力较大, 故选取该区格来验算其长边中点的折算应力。面板的边长比 $b/a = 2.19 > 1.5$, 按下式验算面板的折算应力, 具体计算如下:

$$\sigma_{zh} = \sqrt{(\sigma_{my})^2 + (\sigma_{mx} + \sigma_{ox})^2} - (\sigma_{my})(\sigma_{mx} + \sigma_{ox}) \leq 1.1\alpha[\sigma]$$

$$\sigma_{my} = k_y q a^2 / \delta^2 = 0.498 \times 0.029 \times 800^2 / 10^2 = 93.7 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{mx} = \mu \sigma_{my} = 0.3 \times 93.7 = 28.11 \text{ N/mm}^2$$

对应于面板区格 IV 在长边中点的主梁弯矩:

$$M = 47.26 \times \frac{10}{2} \times \left(\frac{1.75}{2} + 1.53 \right) - \frac{47.26 \times (1.75 + 1.75/2)^2}{2} = 506.27 \text{ kN}$$

$$\sigma_{ox} = M / W = 506.27 / 8.16 = 62.04 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{zh} = \sqrt{93.7^2 + (28.11 + 62.04)^2} - 93.7 \times (28.11 + 62.04) = 91.98 \text{ N/mm}^2 \leq 1.1\alpha[\sigma] = 1.1 \times 1.5 \times 160 = 264 \text{ N/mm}^2$$

计算表明: 面板强度满足要求。

3.5.1.3 闸门启闭力复核

(1) 闭门力按《水利水电工程钢闸门设计规范》中式, 计算: $F_w = 1.2 \times (T_{zd} + T_{zs}) - N_G \cdot G$

$$\text{滚轮摩擦力: } T_{zd} = \frac{P}{R} (f_1 r + f_k) = \frac{478.24}{32.5} \times (0.12 \times 2 + 1) = 18.25 \text{ kN}$$

$$\text{止水摩擦力: } T_{zs} = 2fbHp = 2 \times 0.7 \times 0.06 \times 4.0 \times 11.96 = 4.02 \text{ kN}$$

则 $F_w = 1.2 \times (18.25 + 4.02) - 0.9 \times 152.3 = -110.35 \text{ kN}$, 可依靠自重关闭闸门。

(2) 启门力按《水利水电工程钢闸门设计规范》中式计算: $F_Q = n_T (T_{zd} + T_{zs}) + n_G G + p_x$

$$\text{滚轮摩擦力: } T_{zd} = \frac{P}{R} (f_1 r + f_k) = \frac{478.24}{32.5} \times (0.12 \times 2 + 1) = 18.25 \text{ kN}$$

$$\text{止水摩擦力: } T_{zs} = 2fbHp = 2 \times 0.7 \times 0.06 \times 4.0 \times 11.96 = 4.02 \text{ kN}$$

$$\text{则: } F_Q = 1.2 \times (18.25 + 4.02) + 1.1 \times 152.3 = 1963.96 \text{ kN}$$

综上所述分析, 选用 QPQ2×10 吨卷扬式启闭机满足要求。按照《水闸评价安全导则》(SL214-2015), 该闸闸

门结构满足标准要求,故闸门结构安全评定级别为A。

4 结论

(1) 闸顶高程稍显不足,该闸的过流能力满足要求,但该闸设计时允许河道行洪时漫顶,所以防洪标准满足要求,评定为A级。

(2) 闸室闸基防渗长度满足要求,水平坡降、出口坡降均满足规范要求。渗流安全满足标准要求,运行正常,评定为A级。

(3) 在各种计算工况下,闸室抗滑稳定安全系数和地基应力不均匀系数均满足规范要求,故评定为A级。闸室基底应力小于基底土的允许承载力值,故地基承载力满足要求,评定为A级。

(4) 闸室底板、闸墩的结构承载能力均满足要求,评定为A级。

(5) 消力池的池深、消力池长度、消力池底板厚度、海漫长度均满足要求。即消能防冲满足标准要求,评定为A级。

(6) 闸门主梁强度满足要求,面板强度满要求,选用QPQ2×10吨卷扬式启闭机满足要求,闸门结构安全满足标准要求,闸门结构安全评定为A级。

综上所述:

(1) 防洪标准满足要求,评定为A级;

(2) 渗流安全满足标准要求,运行正常,评定为A级;

(3) 结构安全基本满足标准要求,但单项评价指标中存在B分级,评定为B级。

(4) 金属结构满足标准要求,评定级别为A级。

经综合分析评价,运用指标基本达到设计标准,工程存在一定损坏,经大修后,可达到正常运行。按照《水闸安全评价导则》(SL214-2015)第5.0.3条,工程质量与各项安全性分级有一项为B级,故该闸工程安全类别拟定为二类闸。建议进一步加强对该工程的维修加固。

【参考文献】

[1] 王海婧. 水闸安全鉴定技术研究与实践[D]. 济南: 山东大学, 2013.

[2] 曹海燕. 皖河闸安全复核分析评价[J]. 吉林水利, 2007(2): 21-24.

[3] 王子成, 杨雷. 白沙滩灌区前杭排涝站安全复核计算与分析评价[J]. 农业与技术, 2011, 31(6): 74-76.

作者简介: 赵苗苗(1992.3—), 女, 汉族, 毕业学校: 扬州大学; 苏州市水利设计研究院有限公司; 陆泽林(1988.9—), 男, 汉族, 毕业学校: 宿州学院; 苏州市水利设计研究院有限公司; 刘豹(1992.8—), 男, 汉族, 毕业学校: 扬州大学; 苏州市相城区漕湖街道建设管理办公室。