

旧实用堰闸改造加固施工仿真计算

彭宣茂¹ 陈显春² 林炳局³

(1. 河海大学土木工程学院 江苏 南京 210098 ; 2. 金丽温高速公路永嘉鹿城段工程建设指挥部 浙江 温州 325106 ;
3. 温州市政工程建设开发办公室 浙江 温州 325000)

摘要 探讨了一种简单实用的数值方法 , 可以模拟旧实用堰拆除时的应力释放和内力重分布 , 对旧闸改造加固的整个施工过程进行仿真计算 , 求出各施工阶段的地基反力以及结构的位移、应力和内力。
关键词 实用堰闸 加固 施工 仿真计算
中图分类号 :TV66 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2004)03-0279-04

我国在 20 世纪五六十年代建造的各种实用堰闸为防洪、排涝、灌溉起到了巨大的作用^[1]。但随着国民经济的迅速发展 , 防洪标准的提高 , 很多闸都面临着改造或加固的问题。拆除实用堰 , 对底板进行加固是保证或提高过水流量的一种简单和经济的方法。实用堰拆除时 , 原堰段处底板的截面急剧变小 , 且面层无钢筋 , 成为纯混凝土土段 , 而上下游闸底板的截面不变 , 面层仍有钢筋 , 属于钢筋混凝土。实用堰拆除后 , 闸底板的截面形式发生了变化 , 其整体抗弯刚度和强度都将发生改变 , 实用堰内强大的应力要被释放 , 底板各处的内力将自动调整或重新分布。建立合适的力学分析模型 , 模拟实用堰拆除时的应力释放和内力重分布规律及改造加固的施工过程 , 是一个重要而又复杂的力学课题。笔者在实践中探讨了一种简单实用的数值方法 , 可以对旧实用堰闸改造加固的整个施工过程进行仿真计算。

1 直接拆除实用堰时的仿真计算

现假定实用堰拆除后 , 整个结构和地基均处在弹性状态 , 即实用堰拆除前后应力的释放和重分布可以自动调整到最终状态 , 而不考虑时间效应。这时可以取实用堰拆除后的闸室结构、地基系统作为计算对象。计算得到的闸底板应力实际上已经反映了实用堰拆除的应力释放和重分布。可以说明如下 : 如图 1 所示 , 设闸室现状结构的计算区域为 Ω (包括实用堰、闸墩、底板和地基) , 为了简单起见 , 只画出实用堰和底板部分) , 荷载条件为 Q (包括实用堰自重 q 和板上荷载 p) 结构的刚度为 K_{Ω} 。根据这种几何和刚度条件 , 可以求得荷载 q 和 p 作用下的底板应力状态为 σ_0 。设闸底板的区域为 Ω_0 。对应的刚度为 k_{Ω_0} , 实用堰区域为 Ω_1 , 则 $\Omega = \Omega_0 \cup \Omega_1$ 。实用堰和闸底板的接触表面区域为 $\bar{\Gamma}$ ($\bar{\Gamma}$ 还包括实用堰和闸墩的接触表面) , 在接触表面 $\bar{\Gamma}$ 上有相互作用力 $\bar{P}$ 。因此底板区域 Ω_0 的应力状态 σ_0 可以理解为是在计算区域为 Ω_0 、结构刚度为 k_{Ω_0} 、荷载为板上荷载 p 和相互作用的面力 $\bar{P}$ 的作用下所引起的。根据叠加原理 , σ_0 可表示为

$$\sigma_0 = \sigma_p + \sigma_{\bar{P}} \tag{1}$$

式中 : σ_p ——板上荷载 p (实际上包括实用堰上荷载以外的所有荷载) 作用在区域 Ω_0 时的应力 ; $\sigma_{\bar{P}}$ ——接触表面力 $\bar{P}$ 作用在区域时的应力。这就是现状下闸底板的应力状态。
当实用堰拆除后 , 接触面 $\bar{\Gamma}$ 成为自由面 , 此时在 $\bar{\Gamma}$ 面上的应力为 0。对底板来说就是在 $\bar{\Gamma}$ 上施加一个和 $\bar{P}$ 大小相同、方向相反的面力 $-\bar{P}$ 。其受力过程如图 2 所示。由于图 2 a) 和图 2 b) 的几何和刚度条件完全相同 , 根据叠加原理 , 底板的应力状态可表示为图 2 c) 所示。即当实用堰拆除后 , 底板的应力状态 σ 为

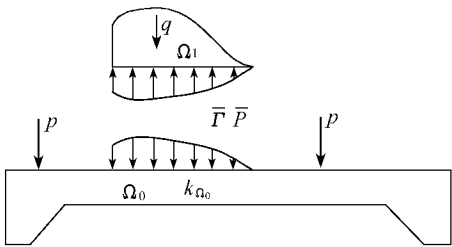


图 1 结构示力
Fig.1 Diagram of structural stress

$$\sigma = \sigma_0 - \sigma_{\bar{p}} = \sigma_p + \sigma_{\bar{p}} - \sigma_{\bar{p}} = \sigma_p \tag{2}$$

由此可见,当直接拆除实用堰时,底板内力只与底板(包括闸墩、地基)本身的几何区域、结构刚度 K 和荷载 p 有关,而与实用堰无关.因此,当直接拆除实用堰时的有限元计算模型就是实用堰拆除后的闸墩、底板和地基体系.这时底板的应力状态实际上已经考虑了实用堰应力的释放和调整.

2 先加固后拆除实用堰时的仿真计算

当考虑先加固上、下游底板后拆除实用堰时,为了反映拆除实用堰后的应力释放和内力重分布,其计算模型要比直接拆除实用堰时复杂得多.它需要考虑加固中的施工过程和顺序.计算中结构的区域和整体刚度随加固过程而改变.因此是一个考虑施工过程的变刚度非线性计算.

现假定在原来闸室结构的基础上,对上、下游底板先加固.设原结构区域为 $\Omega = \Omega_0 \cup \Omega_1$,所加固的区域为 Ω_2 ,则加固后的计算总区域为 $\Omega'' = \Omega \cup \Omega_2 = \Omega_0 \cup \Omega_1 \cup \Omega_2$.如果忽略加固部分的荷载作用,则加固后结构的应力状态和图 1 完全一样为 σ_0 .这是因为加固部分对原来的应力状态是不会改变的.即这时的计算区域仍为 Ω ,刚度仍然为 k_{Ω} .在实用堰和底板的接触面 $\bar{\Gamma}$ (实际上还有实用堰和加固部分的接触面)同样有相互作用的面力 $\bar{P}$.如图 3 所示,设实用堰拆除后的计算区域 $\Omega' = \Omega_0 \cup \Omega_2$,加固区域 Ω_2 上的应力为 0,底板的应力状态 σ_0 和式(1)的表达式完全一样.

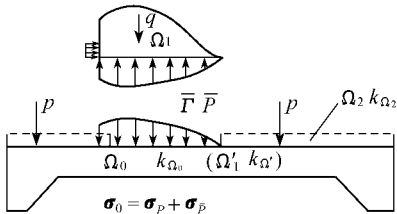


图 3 先加固后拆除实用堰受力图

当实用堰拆除后,在接触面 $\bar{\Gamma}$ 上的应力为 0,对底板来说就是在 $\bar{\Gamma}$ 面上施加一个大小和 $\bar{P}$ 相同、方向相反的面力 $-\bar{P}$.这时底板的应力状态为

$$\sigma' = \sigma_0 - \sigma'_{\bar{p}} = \sigma_p + \sigma_{\bar{p}} - \sigma'_{\bar{p}} \tag{3}$$

由于 $\sigma_{\bar{p}}$ 是在区域 Ω_0 、刚度 k_{Ω_0} 条件下,由 $\bar{\Gamma}$ 上的 $\bar{P}$ 引起的应力,而 $\sigma'_{\bar{p}}$ 是在区域 Ω' 、刚度 $k_{\Omega'}$ 条件下由 $\bar{\Gamma}$ 上的 $\bar{P}$ 引起的应力.虽然荷载相同,但几何区域和刚度条件不同,故 $\sigma_{\bar{p}}$ 和 $\sigma'_{\bar{p}}$ 不会相等.因此 σ' 不等于 σ_p .为此必须不同的区域和刚度、荷载作用下分别求出 σ_0 和 $\sigma'_{\bar{p}}$.即计算应当分为两步进行.第一步是根据现状在 Ω, k_{Ω} 和 p, q 条件下求出 σ_0 ;第二步

在 $\Omega', k_{\Omega'}$ 和 $\bar{P}$ 条件下求出 $\sigma'_{\bar{p}}$,最后根据式(3)进行叠加,才可得到先加固后拆除实用堰时的应力状态.如果要考虑加固部分直接作用的荷载,可在第二步中进行加载.为了实现上述计算方法和步骤,关键是要解决几何区域和荷载条件随施工过程而变化的有限元^[2]模拟.

2.1 几何区域改变的有限元模拟

如图 4 所示,将底板加固后的计算系统抽象为区域 Ω'' ,需要拆除的实用堰为 Ω_1 ,加固部分为 Ω_2 ,原底板区域为 Ω_0 .则现状结构区域 $\Omega = \Omega_0 \cup \Omega_1$,加固并拆除实用堰时的区域 $\Omega' = \Omega_0 \cup \Omega_2$.很显然, $\Omega'' = \Omega' \cup \Omega_1 = \Omega_0 \cup \Omega_1 \cup \Omega_2$.则实用堰的拆除问题可以转化为从加固后的 Ω'' 中拆除 Ω_1 的问题.设 $E_{\Omega''}$ 为 Ω'' 的有限元离散, $E_{\Omega_0}, E_{\Omega_1}, E_{\Omega_2}$ 分别为 $\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2$ 的有限元离散,则

$$\left. \begin{aligned} E_{\Omega''} &= E_{\Omega_0} \cup E_{\Omega_1} \cup E_{\Omega_2} \\ E_{\Omega'} &= E_{\Omega_0} \cup E_{\Omega_2} \\ E_{\Omega} &= E_{\Omega_0} \cup E_{\Omega_1} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

一般做法是采用几何模拟,即第一次计算采用 E_{Ω} ,第二次计算采用 $E_{\Omega'}$,两次计算采用不同的网格和编码.由于计算中要重新剖分网格和重新编码,不仅增加了成倍的数据准备工作量,而且对实用堰拆除前后成果的

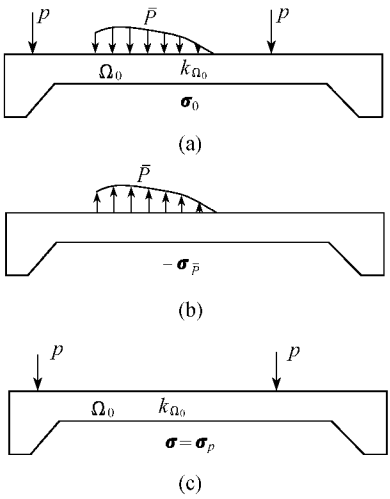


图 2 直接拆除实用堰的受力过程
Fig.2 Stress diagram for direct demolition of practical weir

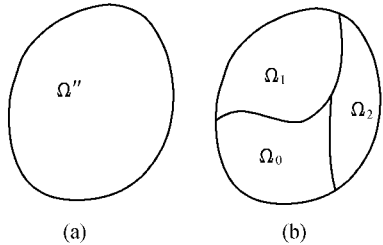


图 4 几何条件改变的模拟
Fig.4 Simulation of alternation of geometrical condition

叠加和整理造成很大的困难.

为了克服这种困难,可以采用物理模拟计算区域的改变方法. 计算时保持总的计算区域 Ω'' 和 $E_{\Omega''}$ 不变, 即一次性剖分网格和编码. 不同的计算都是采用消去刚度的方法来改变计算区域. 即第一次计算消去 E_{Ω_2} 中的刚度, 第二次计算还原 E_{Ω_2} 中的刚度而消去 E_{Ω_1} 中的刚度. 这种模拟的方法不改变原始网格的形状和编码, 便于程序的实现和成果整理, 而且不增加计算工作的原始信息量, 从而提高计算效率.

2.2 荷载条件改变的有限元模拟

设拆除前 Ω'' 的应力状态为 σ_0 . Ω_1 和 Ω' 之间的相互作用力如图 5 所示. 作用面上的面力为 $\bar{P}$. 拆除后 Ω_1 和 Ω' 的交界面将成为自由面, 即该面上的应力为 0. 设 Ω_1 和 Ω' 的界面为 $\bar{\Gamma}_{\Omega_1}$, Ω' 和 Ω_1 的交界面为 $\bar{\Gamma}_{\Omega'}$, 为使拆除后的 $\bar{\Gamma}_{\Omega'}$ 成为自由面, 应在 $\bar{\Gamma}_{\Omega'}$ 施加与 $\bar{P}$ 大小相等方向相反的表面荷载, 称之为拆除荷载, 将由此产生的等效结点荷载记为 ΔF .

根据作用力与反作用力大小相等、方向相反的原理, $\bar{P}$ 在 $\bar{\Gamma}_{\Omega'}$ 产生的等效结点荷载正好等于拆除荷载 ΔF . 这可以由 Ω_1 的平衡条件来加以确定. 如果除 ΔF 以外作用在 Ω_1 上的外荷载只有自重, 则根据 Ω_1 中的平衡条件可得

$$\sum_{e \in E_{\Omega_1}} \iiint_{\Omega_e} \mathbf{C}^e \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_0^e d\Omega = \Delta \mathbf{F} + \sum_{e \in E_{\Omega_1}} \iiint_{\Omega_e} \mathbf{C}^e \mathbf{N}^T \mathbf{Y}^e d\Omega$$

(5) Fig.5 Simulation of alternation of load condition

从而可以用拆除的应力状态和 Ω_1 中的自重表示拆除荷载

$$\Delta \mathbf{F} = \sum_{e \in E_{\Omega_1}} \iiint_{\Omega_e} \mathbf{C}^e \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_0^e d\Omega - \sum_{e \in E_{\Omega_1}} \iiint_{\Omega_e} \mathbf{C}^e \mathbf{N}^T \mathbf{Y}^e d\Omega$$

(6)

式中: $\boldsymbol{\sigma}_0^e$ ——拆除前 e 单元的应力; $\mathbf{B}$ ——单元的应变矩阵; $\mathbf{C}^e$ ——单元选择矩阵, 它的元素由 0, 1 组成; $\mathbf{N}$ —— e 单元的形函数矩阵; $\mathbf{Y}$ —— e 单元的体力密度矩阵. 若只有自重沿 y 方向作用, 单元的容重为 γ , 则

$$\mathbf{Y} = \{0 \quad -\gamma \quad 0\}^T$$

(7)

有了等效的结点荷载, 将拆除前后计算得到的结果进行叠加, 就可以得到最终加固后的结果.

2.3 钢筋的模拟与概化

水闸结构一般都是钢筋混凝土或少筋混凝土结构. 要准确地按钢筋混凝土理论对空间钢筋混凝土结构进行三维有限元计算是很困难的. 为了能够在空间有限元计算中考虑钢筋的作用, 假定钢筋和混凝土的位移是连续的, 将钢筋按照实际分布情况布置在混凝土内, 对每根钢筋沿长度方向按一定的长度剖分单元. 单元的结点位移就是该点所在混凝土单元内的位移, 计算时采用迭代的方法进行求解. 由于钢筋单元的结点可以位于空间有限元网格中的任意一点, 因此可以比较方便地模拟实际的钢筋布置. 但是有时为了减少计算量, 可以采用等效计算钢筋面积的方法^[31], 将同截面上布置的多层钢筋在保证相同的刚度和强度条件下进行概化, 从而提高计算效率.

3 工程实例

某水库泄洪闸整个闸室沿垂直水流方向总宽度为 178 m, 分为 5 段, 各段的结构形式完全相同, 其宽度为 35.6 m, 分为 3 孔, 有 2 个中墩和 2 个缝墩, 厚度分别为 1.6 m 和 1 m. 每孔净宽为 10 m, 闸室沿水流方向长 22 m. 闸室底板靠上、下游设有深为 2 m 的变截面齿墙. 底板的底面高程为 14 m, 顶面高程为 16 m, 厚度为 2 m. 从离上游齿墙端部 4.5 m 处开始设有实用滚水堰, 其上游端由低到高为直线变化, 下游由低到高为曲线变化, 堰底长 8 m, 顶长 3 m, 堰顶最高高程为 19 m, 从底板顶面算起实用堰最大高度为 3 m.

该闸改建加固方案所拟定的措施是分段拆除闸门、启闭机等工作机械, 在上游闸墩处设置浮箱式围堰, 施工期上游设计水位为 24 m, 下游水位为 9.6 m. 拆除实用堰至底板高程 16 m 后, 再将整个底板加固到 16.5 m, 或者先将上、下游底板加固到 16.5 m, 再拆除实用堰至 16 m, 最后再将堰段处底板加固至 16.5 m. 在改建加固过程中, 相邻闸室还要能保持正常运行.

根据各种可能的加固方案和措施及不同比例的边荷载条件, 分别对中段底板和边段底板进行了计算分析. 计算情况分为 9 种. 对于中段底板有 (a) 直接拆除实用堰, 考虑 100% 边荷载; (b) 直接拆除实用堰, 考虑

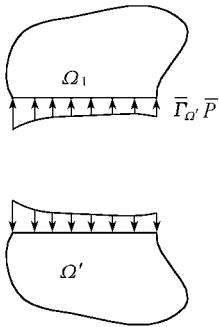


图 5 荷载条件改变的模拟

(5) Fig.5 Simulation of alternation of load condition

75%边荷载 (e)直接拆除实用堰 ,不考虑边荷载 (d)上游加固 4.5 m ,下游加固 11.5 m 钢筋混凝土后 ,再拆除实用堰 ,考虑 100%边荷载 .对于边段底板有 (e)直接拆除实用堰 ,考虑 100%边荷载 (f)上游底板先加固 4.5 m ,下游底板加固 11.5 m 后 ,再拆除实用堰 ,考虑 100%边荷载 (g)上游底板先加固 4.5 m ,下游底板加固 11.5 m 后 ,再拆除实用堰 ,考虑 75%边荷载 (h)上游靠近实用堰加固 2 m ,下游加固 11.5 m 后 ,再拆除实用堰 ,考虑 75%边荷载 .(i)上、下游加固 3 根钢筋混凝土梁 ,其余加固纯混凝土 ,考虑 75%边荷载 .

按照以上介绍的计算方法 ,对该闸 9 种情况进行了计算 ,求出了各施工期的地基反力和结构的位移、应力、内力等 .由于篇幅原因 ,仅给出各种情况下纯混凝土段的最大弯矩、应力以及对应的安全系数见表 1 .

表 1 各种加固情况下纯混凝土段的内力和安全系数

Table 1 Internal force and safety coefficient of plain concrete block under all kinds of strengthening conditions									
位置	加固情况	边 孔				中 孔			
		$M_{\max}/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	$N/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\sigma_{\max}/(\text{MPa})$	$K_{\min}$	$M_{\max}/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	$N/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\sigma_{\max}/(\text{MPa})$	$K_{\min}$
中段 底板	1	551	94	0.87	1.86	490	240	0.85	1.90
	2	469	80	0.74	2.19	395	193	0.68	2.36
	3	224	24	0.35	4.56	113	38	0.18	8.61
	4	444	7	0.69	2.43	424	72	0.67	2.42
边段 底板	5	696	108	1.09	1.48	576	270	0.99	1.63
	6	572	28	0.88	1.84	501	69	0.78	2.07
	7	480	- 34	0.70	2.32	404	54	0.63	2.57
	8	493	- 27	0.72	2.24	414	85	0.66	2.45
	9	498	- 35	0.73	2.23	420	98	0.69	2.35

由此可以看出 ,各种情况下纯混凝土段底板最大弯矩和应力发生在边孔 ,而最大轴力发生在中孔 .

4 结 语

随着国民经济的发展和防洪标准的提高 ,我国很多老闸和病闸需要加固、改造或扩建 .如何通过先进的计算手段对加固改造过程进行仿真计算分析 ,是一项很有实际工程意义的工作 .本文对实用堰闸加固改造施工过程的仿真计算方法可以推广到一般的水闸加固改造计算 .

参考文献 :

[1]谈松曦 .水闸设计[M].北京 :水利电力出版社 ,1986.1—10.
[2]监凯维奇 D C.有限元法[M].北京 :科学出版社 ,1985.70—80.
[3]彭宣茂 ,傅作新 ,钱向东 .三峡泄洪坝段孔口配筋方案空间弹塑性分析[J].人民长江 ,2001 ,32(4) 9—11 .

Simulation of construction process for rebuilding
and reinforcement of old weir gates

PENG Xuan-mao¹ , CHEN Xian-chun² , LIN Bing-ju³

(1. College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;
2. Construction Headquarters of Yongjia-Lucheng Section of Jinliwen Superhighway , Wenzhou 325106 , China ;
3. Wenzhou Municipal Engineering Construction Developing Office , Wenzhou 325000 , China)

Abstract : A simple and practical numerical method is presented , which can simulate the stress release and internal force redistribution during the demolition of old weirs . With the method , the construction process of rebuilding and reinforcement of old weirs can be simulated , and the reaction force of the foundations and the displacement , stress , and internal force of the structures can also be obtained .

Key words : weir gate ; reinforcement ; construction ; simulation calculation