

砂砾石深覆盖层上水闸沉降计算与控制分析

顾小芳¹, 任旭华¹, 邵 勇¹, 邓 彬²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 针对砂砾石深覆盖层上闸坝的沉降计算问题, 采用 ANSYS 中的面面接触模型模拟闸坝的结构缝, 结合锦屏二级水电站首部拦河闸工程, 实现了绝对沉降和不均匀沉降的计算。提出了控制闸坝沉降和不均匀沉降的措施, 并通过对不同工作条件下闸基的沉降分析, 对固结灌浆加固措施进行了论证, 指出锦屏二级水电站首部拦河闸工程固结灌浆的变形模量必须提高到 68.5 MPa 才能将闸室沉降量控制在水闸规范允许的范围内。

关键词 水闸; 深覆盖层; 面面接触模型; 沉降计算; 沉降控制

中图分类号 TV66 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2007)01-0017-04

Settlement calculation and control analysis of sluice on deeply covered layer of sandy gravel // GU Xiao-fang¹, REN Xu-hua¹, SHAO Yong¹, DENG Bin² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : By use of the surface-to-surface contact model of ANSYS to simulate the structural joints of sluice dams, the absolute settlement and uneven settlement of the river sluice project at Jinping Grade-II Hydropower Station were calculated, and some measures were proposed for controlling the absolute settlement and uneven settlement of the sluice dam. Based on settlement calculation of sluice foundation under different operation conditions, the effectiveness of consolidation grouting measure was verified. It is necessary to improve the consolidation deformation modulus of the river sluice foundation to 68.5 MPa, so that the lock chamber settlement could be controlled within the permissible range of the sluice code.

Key words : sluice; deeply covered layer; surface-to-surface contact model; settlement calculation; settlement control

西部地区水利水电的开发将使以后的水利建设更多地涉及在深覆盖层上修建闸坝的问题^[1-2]。深覆盖层上建造的闸坝, 由于地质条件复杂、地基土的压缩性较大, 往往产生较大的沉降及不均匀沉降^[3-4], 将会严重影响闸坝运行, 甚至会使其失效。因此, 必须对沉降进行计算与控制。

按 $e-p$ 或 $e-lgp$ 曲线的分层总和法计算地基的沉降量在成层状地基工程中得到了广泛的应用^[5-7], 其基本理论和方法的正确性已得到了验证, 但这种方法采用了一系列简化假定, 与实际情况并不完全符合。近几十年来, 有限单元法的发展^[8]使得建立三维有限元整体模型解决工程问题得到越来越多的应用, 它能更好地模拟工程实际情况, 计算结果也更精确可靠。锦屏二级水电站建在砂砾石深覆盖层上, 覆盖层地质情况复杂, 河床中间深厚而往两岸渐薄, 不宜运用分层总和法进行沉降计算。本文通过建立整体三维有限元模型, 运用 ANSYS 对其进行沉降计算, 结构缝运用面面接触模型模拟。面面接触

模型模拟闸坝的结构缝, 可模拟相邻闸坝之间发生的滑移、张开并且不发生嵌入(与闸坝的工作性态相符合)的情况, 也就可以计算出闸坝之间的绝对沉降和不均匀沉降。迄今为止, 这方面的计算应用甚少。

1 计算分析方法

闸坝上部为混凝土结构, 地基为深覆盖层。上部结构设结构缝, 结构缝按面面接触模型模拟, 地基采用理想弹塑性本构模型模拟。

1.1 上部结构的模拟^[8-10]

1.1.1 面面接触原理

为减小闸室底板的拉应力, 闸坝采用分离式结构, 闸墩中间及闸室底板设结构缝, 结构缝采用面面接触模型模拟。接触是一种高度的状态非线性行为, 接触边界由目标面和接触面组成, 有限元模型通过指定的接触单元来识别可能的接触配对。接触系统基本方程由平衡方程和接触条件两部分组成。

如图 1 所示, 设有两弹性体 Ω_1 和 Ω_2 , 其接触界

面为 S , 界面上局部坐标系为 $Oxyz$, 向量 n 表示接触面的法向, 由体 Ω_2 指向体 Ω_1 , 向量 a, b 为接触面内两正交的向量。引入虚位移 δ , 由虚功原理得

$$\int_{\Omega_1+\Omega_2} d\sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} d\Omega = \int_{\Omega_1+\Omega_2} df_i \delta du_i d\Omega + \int_{S_\sigma} d\bar{t}_i \delta du_i dS \quad (i, j = x, y, z) \quad (1)$$

式中: S_σ 为应力边界; $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ 分别为应力张量和应变张量分量; $d\sigma_{ij}, d\varepsilon_{ij}$ 分别为应力张量增量和应变张量增量分量; du_i 为位移增量分量; $df_i, d\bar{t}_i$ 分别为给定的体力增量和面力增量。

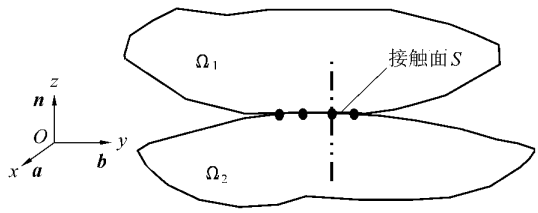


图1 面面接触简图

由最小势能原理可导出有限元基本方程:

$$K\delta = F \quad (2)$$

式中: K 为刚度矩阵; δ 为节点位移列阵; F 为节点荷载列阵。

1.1.2 面面接触条件

面面接触界面的接触条件有 3 种: ①界面黏合状态 法向应力大于 0, 法向位移为 0, 即 $\sigma_n \geq 0, \Delta u_n = 0$; ②界面相对滑动状态 法向位移大于 0, 即 $\Delta u_n \geq 0$; ③界面脱开状态 法向位移大于 0, 即 $\Delta u_n > 0$ 。

1.2 地基的模拟

地基采用理想弹塑性本构模型模拟。常用的破坏、屈服准则有 Mohr-Coulomb 准则和 Drucker-Prager 准则。

Mohr-Coulomb 准则在 π 平面上的屈服轨迹为六角形, 其屈服函数表示为

$$f = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \varphi \right) - c \cos \varphi = 0 \quad (3)$$

Drucker-Prager 准则在 π 平面上的屈服轨迹为一圆, 其屈服函数表示为

$$f = 2I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (4)$$

2 实例分析

2.1 工程概况

雅砻江锦屏二级水电站首部枢纽拦河闸坝建在砂砾石深覆盖层上, 河谷呈 V 形, 河床覆盖层最大厚度达 47.75 m, 结构较松散, 局部有架空。砂砾石覆盖层按其结构、成因和组成, 自下而上分为 4 层,

各层岩性如下:

- a. I 层——含漂石卵砾石层 (Q_3^{al}): 大多分布于左侧河槽, 厚度可达 30 m, 块石粒径一般为 25 ~ 40 cm, 碎石粒径 7 ~ 10 cm, 并有少量大于 1 m 的孤石分布。
- b. II 层——含砂壤土碎砾石层 (Q_3^{pl+al}): 碎砾石成分单一, 碎石粒径 6 ~ 8 cm, 岩质较软。
- c. III-1 层——含孤块石卵砾石层 (Q_4^{al}): 分布于河床上部右岸, 为现代河床冲积层, 厚度一般 8 ~ 14 m, 卵砾石成分复杂, 粒径 1 ~ 2 cm。局部有架空。
- d. III-2 层——块碎石夹砾卵石层 (Q_4^{Col+al}): 主要分布于河床表部, 一般厚 4 ~ 8 m, 为岸坡崩积与现代河床冲积的混合层, 粒径一般 10 ~ 20 cm, 大者约 100 cm。架空现象较为普遍。

闸基存在不均匀沉降问题, 并预计其绝对沉降及不均匀沉降均较大, 将成为控制该工程设计的关键要素。该水闸最大闸高 37 m, 设有 5 孔泄洪闸, 每孔净宽 13 m, 溢洪道闸墩厚 7 m, 每个闸墩中间均设沉降缝, 闸室底板厚 6 m。

2.2 计算模型

经过对锦屏二级工程资料详细分析, 建立了数值分析整体模型, 上部结构包括铺盖、闸室、挡水坝、护坦和导流墙, 下部结构包括 4 层覆盖层和基岩, 整体模型如图 2 所示, 图 3 为模型局部网格。模型以垂直河流指向右岸为 x 轴, 垂直河流指向下游为 y 轴, 竖直向上为 z 轴, 模型尺寸为 300 m $\times$ 300 m $\times$ 200 m。采用退化的 20 节点六面体单元自由剖分, 单元类型采用 SOLID95, 整个模型单元总数 857 05 个, 节点总数 125 357 个。

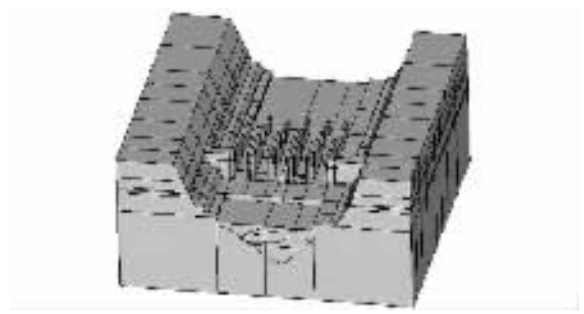


图2 锦屏二级水电站首部枢纽拦河闸坝基本模型



图3 模型局部网格

为能较好地反映闸坝、覆盖层、基岩的不同特性,混凝土及岩石采用线弹性模型模拟,覆盖层及回填料采用理想弹塑性模型模拟,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则。

闸墩中间、铺盖以及护坦之间的接触面两侧材料性质相当,采用柔-柔面面接触模型模拟。采用 CONTAC174 定义接触面, TARGE170 定义目标面^[11]。闸前铺盖、闸后护坦与覆盖层之间的接触面以及闸室底板与固结灌浆之间的接触面的摩擦系数 f 取 0.4。

2.3 材料参数

经地质勘测后,拦河闸坝、基础覆盖层及基岩物理力学参数建议取值见表 1。

表 1 参数取值					
工程部位	密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	变形模量/ MPa	泊松比	黏结力/ MPa	内摩擦 角($^{\circ}$)
闸墩(C30)	2.45	30000	0.167		
铺盖、护坦及闸室 底板(C25)	2.45	28000	0.167		
挡水坝(C20)	2.40	25500	0.167		
固结灌浆区未固结	2.00	45	0.30	0	28
I 层	2.10	55	0.28	0	28
II 层	2.00	45	0.30	0	29
III-1 层	1.95	45	0.28	0	27
III-2 层	2.00	45	0.30	0	30
基 岩	2.72	7500	0.29	0.65	38

2.4 沉降计算及分析

计算中考虑覆盖层地基初始应力的影响,消去由初始应力引起的位移。计算结果证实用面面接触模型模拟结构缝实现不均匀沉降的计算是可行的。图 4 为水闸竣工期间室 z 方向沉降等值线。

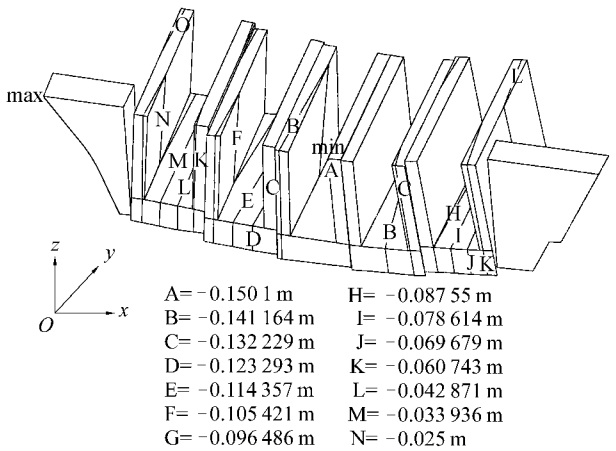


图 4 水闸竣工期间室 z 方向沉降等值线

根据计算结果,由于地基覆盖层深厚,承载力小,闸室 z 方向沉降量比较大。闸室 z 方向最大沉降量为 15.01 cm,发生在中间闸孔,这是由于中间闸孔河床覆盖层最大,沉降也就最大,闸室 z 方向最大不均匀沉降量为 5.4 cm,发生在右岸挡水坝与右岸边闸墩之间的结构缝处,这是由于右岸挡水坝建在

基岩上,而边闸墩建在覆盖层上,覆盖层变形模量小,承载力远小于基岩的承载力。

水闸绝大部分沉降是在施工期完成的,沉降速度较快,但运行期由于蓄水沉降较竣工期仍会有所增大,可见,最终其绝对沉降量将会大于 15 cm。因此必须考虑对闸室的沉降进行控制。

2.5 沉降控制及分析

一般地,为控制闸坝的沉降,可采用的措施有:
①对闸坝的上部结构进行优化布置,如采用重量较轻、刚度较大的空箱式底板^[12-13];
②挖除覆盖层后浇筑新的基础能有效地提高整体变形模量,但因工程量、施工难度大、影响工期,故一般不被采用^[2];
③对闸坝的基础进行加固处理^[14],有两种途径,一是提高地基整体变形模量,一是缩小相邻闸坝基础的力学参数,前者可以减小地基的绝对沉降和不均匀沉降,后者主要用来减小地基的不均匀沉降。一般采取的主要基础处理措施有高压旋喷、固结灌浆、振冲加固、换土垫基等,经过合理设计后往往能使覆盖层满足建筑物对基础的要求。本工程在闸室下覆盖层与基岩交界的地方回填砂卵石以减小边闸墩与挡水坝之间的不均匀沉降。下面主要考虑对闸室地基进行混凝土固结灌浆处理后闸室沉降的改变,其他处理措施的影响在此不予考虑。

固结灌浆作为一种地基处理措施,能有效提高和改善地基的完整性、整体变形模量、均质性、强度和不透水性,可以用来降低闸室的沉降,而且施工方便、造价低,在坝工工程中得到了广泛的应用^[15-16]。

沉降分析中考虑对闸室的地基进行 15 m 深的混凝土固结灌浆处理,计算固结灌浆区地基弹性模量取不同值时运行期间室的沉降。假设固结灌浆后地基的变形模量变为 45.0 MPa, 52.5 MPa, 60.0 MPa, 67.5 MPa, 75.0 MPa, 分别计算闸室的沉降,得竣工期间室 z 方向最大绝对沉降量分别为 17.9 cm, 16.7 cm, 15.8 cm, 15.1 cm 和 14.5 cm。结构缝处不均匀沉降量见表 2。

表 2 竣工期间室结构缝处 z 方向最大不均匀沉降量

变形 模量/MPa	最大不均匀沉降量/cm					
	1	2	3	4	5	6
45.0	2.8	4.6	1.2	0.1	4.0	6.6
52.5	2.3	4.4	1.4	0.1	3.6	5.8
60.0	2.0	4.0	1.3	0.1	3.3	5.1
67.5	1.7	3.7	1.3	0.1	3.1	4.6
75.0	1.4	3.4	1.3	0.2	2.9	4.2

注:1~6 表示闸室依次由左向右的结构缝编号。

闸室 z 方向最大绝对沉降量均发生在中间闸孔。对闸室地基进行固结灌浆处理后,随着地基变形模量的提高,闸室的最大沉降量明显减小,但减小

的程度趋向平缓,说明进行这种地基处理在某种程度上对减小闸室的沉降量是有效的,但影响渐渐减弱。由计算结果可知,当固结灌浆区的变形模量由 45 MPa 提高到 75 MPa 时,随着承载能力的提高,闸室 z 方向最大绝对沉降量由 17.9 cm 减小到 14.5 cm,减小了 3.4 cm,最大不均匀沉降量由 6.6 cm 减小到 4.2 cm,减小了 2.4 cm。

依据 SL265—2001《水闸设计规范》,要满足最大沉降量不超过 15 cm、最大不均匀沉降量不超过 5 cm 的要求^[17]。根据前面计算的结果,深覆盖层固结灌浆的变形模量至少要达到 68.5 MPa。可以此作为固结灌浆这种地基处理措施所要达到要求的参考。

3 结 论

本文针对深覆盖层上建闸坝所引起的沉降和不均匀沉降问题的计算进行了探讨。为控制闸室的沉降及不均匀沉降,对闸室地基进行了固结灌浆,并计算了不同工作条件下闸室的沉降及不均匀沉降,取得了令人满意的成果。

a. ANSYS 面面接触模型模拟闸坝上的结构缝,可模拟结构缝两边建筑物的滑移、张开和没有嵌入的工作性态,为建在复杂地基上的闸坝不均匀沉降的三维有限元分析提供了一种有效的计算方法。

b. 对雅砻江锦屏二级水电站首部枢纽拦河闸坝的三维有限元计算表明,对闸室地基未作任何处理,即固结灌浆区地基变形模量取 45 MPa,闸室的 z 方向沉降量超过了水闸设计规范的允许范围。

c. 在深覆盖层地区修建闸坝,一般均需对地基进行处理。本文通过对雅砻江锦屏二级水电站首部枢纽拦河闸坝的闸室地基固结灌浆处理的计算,说明地基处理能有效减小闸室的沉降。固结灌浆区地基变形模量的提高能显著地减小闸室 z 方向的最大沉降量,体现了固结灌浆这种地基处理措施的效果,具有广阔的应用前景,加上其施工方便、造价低,对复杂地基的闸坝地基宜优先使用固结灌浆进行处理。

d. 根据计算结果,运行期间闸室 z 方向的最大沉降量可作为控制闸室下覆盖层固结灌浆程度的指标,笔者认为,在本文的计算条件下,对于雅砻江锦屏二级水电站首部枢纽拦河闸坝,固结灌浆的变形模量必须提高到 68.5 MPa 才能将闸室沉降量控制在水闸规范允许的范围之内。

参考文献:

[1] 罗守成.对深厚覆盖层地质问题的认识[J].水力发电,1995(4):21-24.
[2] 杨光伟.闸坝深厚覆盖层基础处理研究[D].成都:四川

大学,2005.
[3] 左东启,王世夏,林益才.水工建筑物:上册[M].南京:河海大学出版社,1995:453-454.
[4] 张丽明.水闸破坏形式与除险加固措施的研究[J].水利科技,2001(2):25-28.
[5] 廖明亮,刘仕勇.西藏达嘎水电站河床覆盖层坝基的稳定性评价与计算[J].水电站设计,2000(12):88-93.
[6] 沈永福.闸(坝)地基的应力和沉降计算[J].水电站设计,1997(6):45-51.
[7] 黄冶,岳丽野,王宗生.基础沉降计算方法的探讨[J].东北林业大学学报,1998(3):69-72.
[8] 李润芳,龚剑霞.接触问题数值方法及其在机械设计中的应用[M].重庆:重庆大学出版社,1991:1-53.
[9] 山田嘉昭.非线性有限元基础[M].北京:清华大学出版社,1988:78-121.
[10] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003:666-702.
[11] 博嘉科技.有限元分析软件:ANSYS 融会与贯通[M].北京:中国水利水电出版社,2002:230-238.
[12] 杨曦.浮运水闸基础处理的探讨[J].湖北水力发电,2004(3):58-60.
[13] 谢其华,叶力明,康小兵.整体式箱框闸室空间结构设和研究[J].浙江水利科技,2004(4):39-43.
[14] 黄站峰,刘川顺,任翔.余码头闸软土地基加固处理[J].土工基础,2004(12):1-4.
[15] 《地基处理手册》编写委员会.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1988:263-264.
[16] 卿忠先,蒋祖浩.固结灌浆和帷幕灌浆在水库坝基处理中的应用[J].西部探矿工程,2003(2):21-22.
[17] SL265—2001,水闸设计规范[S].

(收稿日期:2005-08-31 编辑:熊水斌)

· 简讯 ·

国际大坝委员会第 75 届年会将在圣彼德堡召开

国际大坝委员会第 75 届年会将于 2007 年 6 月 24 ~ 29 日在俄罗斯圣彼德堡召开。会议期间除各专业委员会会议和国际大坝委员会第 75 届执行会议外,还将召开“大坝安全管理——国家、私营公司和公众在大坝设计、施工和运行中的作用”专题研讨会。会议的主要议题有:①大坝安全规范、方法及其在大坝安全中的应用实践;②大坝安全管理中的法律法规和方法框架;③大坝安全管理的一般方法;④大坝风险分析、风险评估方法与风险管理;⑤国际信贷组织对大坝安全的要求;⑥监测和信息诊断系统,大坝维修与加固计划;⑦大坝在水资源、水电管理中的作用;⑧大坝(多坝)管理形式和方法;⑨国家的作用,与企业和金融组织间的关系;⑩水利水电工程投资;⑪大坝建设和运行中正面和负面影响的量化评估。

(本刊编辑部供稿)