

钢衬钢筋混凝土压力管道非线性有限元分析

张红军¹, 司艳菲²

(1. 重庆建工城建集团桥梁工程有限责任公司, 重庆 400060; 2. 重庆大学 经济与工商管理学院, 重庆 400045)

摘要: 采用接触单元并考虑材料的非线性, 通过对钢衬钢筋混凝土压力管道进行三维有限元参数化分析表明, 接触单元能较好地模拟钢衬管与垫层的相互作用, 参数化分析得出各个参数对压力管道的影响, 为压力管道的精确设计提供参考。

关键词: 钢衬钢筋混凝土; 参数化有限元分析; 非线性; APDL

中图分类号: TV134 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-0143(2011)01-0063-05

0 引言

随着我国水电事业的发展, 钢衬钢筋混凝土管道结构越来越多地被用于高HD值的水电站压力管道中^[1]。为了确保钢衬钢筋混凝土压力管道的安全, 为管道设计提供相关的理论依据, 本文以某水电站钢衬钢筋混凝土压力管道为例, 对水电站钢衬钢筋混凝土压力管道的受力状况进行了分析。

采用三维有限元理论, 运用有限元的接触分析技术和材料非线性的本构关系, 结合工程实际情况, 对钢衬钢筋混凝土压力管道建立三维有限元模型, 计算随着内水压力的增大压力管道的受力情况^[2]。然后将钢衬管的厚度、钢衬管与外包混凝土之间的间隙、弹性垫层的厚度、弹性垫层的弹性模量及外包混凝土的厚度作为可变参数, 进行钢衬钢筋混凝土压力管道的参数化分析, 得出钢衬及混凝土结构的受力和承载力与上述各参数之间的关系, 并对计算结果进行分析, 所得结论对钢衬钢筋混凝土压力管道的设计具有一定的指导意义。

1 计算参数及有限元模型

钢衬钢筋混凝土压力管道的钢衬管弹性模量 $E = 206 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 抗拉强度设计值 $\sigma_s = 300 \text{ MPa}$ 。外裹混凝土强度等级为 C25, 弹性模量 $E = 28 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.167$, 轴心抗压强度 $f_c = 12.5 \text{ MPa}$, 轴心抗拉强度 $f_t = 1.27 \text{ MPa}$ 。钢

筋为 II 级, 切线弹性模量 $E_s = 200 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.25$, 屈服强度 $\sigma_s = 310 \text{ MPa}$, 割线弹性模量 $E_s = 20 \text{ GPa}$, 环向配置三层钢筋, 每层为 $40@200$, 体积配筋率为 1.26%。考虑施工、温度变化和混凝土徐变等因素, 弹性垫层材料弹性模量设为 $E = 2 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。

用 APDL 参数化语言建立有限元模型, 如图 1 所示^[3]。有限元模型的细节如图 2 所示, 计算模型采用的基本参数见表 1。

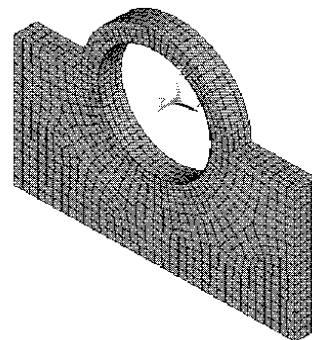


图 1 有限元模型及单元划分

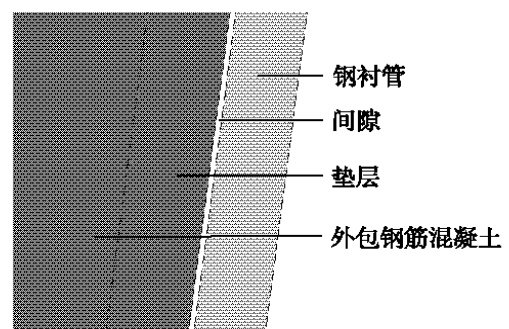


图 2 有限元模型细节图

表1 计算模型的基本参数

水压力值 /MPa	钢管与垫层之间的间隙/mm	弹性垫层的厚度/mm	垫层的弹性模量 /MPa	外包混凝土的厚度/mm	钢衬管的厚度/mm
0.98	2.0	30	2.0	1500	26

注:在实际工程中的间隙也可能出现在垫层与混凝土之间,本文根据计算模型,钢管与混凝土之间的间隙指的是钢管与垫层之间的间隙.间隙值可由钢管冷缩缝隙、施工缝隙、混凝土徐变缝隙、混凝土干缩缝隙、混凝土冷缩缝隙计算得到.

以平面应变为理论依据,取典型部位单位长度的压力管道为研究对象,为了解决钢管和垫层之间的缝隙问题,计算时在钢管与垫层之间设置了空隙来模拟初始缝隙,并将垫层内表面定义为目标面,以钢衬管外表面为接触面,用接触单元来模拟它们之间的受力.并且考虑钢衬和混凝土的非线性,采用三维等参单元建立了钢衬钢筋混凝土三维有限元模型^[4].

外包混凝土采用具有拉裂与压碎性能的单元,使用弹塑性本构关系来描述混凝土的应力应变关系,采用D-P屈服准则分析.钢筋混凝土模型采用整体式来模拟钢筋和混凝土的组合,加上适当的配筋率,既能模拟混凝土内的配筋,又能在后处理中模拟出混凝土的裂缝^[5].

钢材和混凝土的材料非线性本构关系是异常复杂的,计算中使用如图3和图4所示的钢材和混凝土简化后的非线性本构关系.

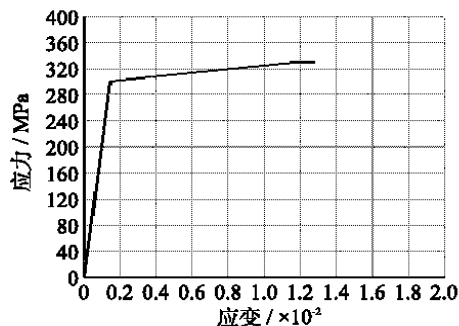


图3 钢材的双折线本构关系图

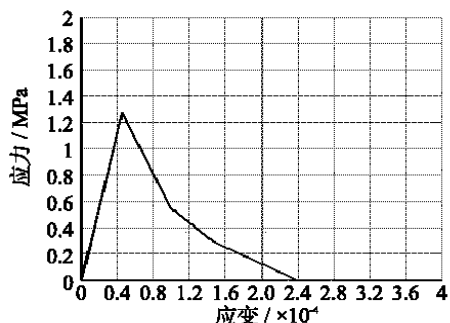


图4 混凝土受拉的多折线本构关系图

2 钢衬钢筋混凝土压力管道水压力下的受力分析

压力管道在不同水压荷载逐级增加,混凝土结构经过弹性、塑性、开裂、裂后和各种应力状

态,钢衬经过弹性、塑性和屈服极限等过程.钢衬钢筋混凝土压力管道一般是采用钢衬和外包钢筋混凝土联合承载的设计原则.

压力管道在水压作用下的应力计算结果如图5和图6所示.

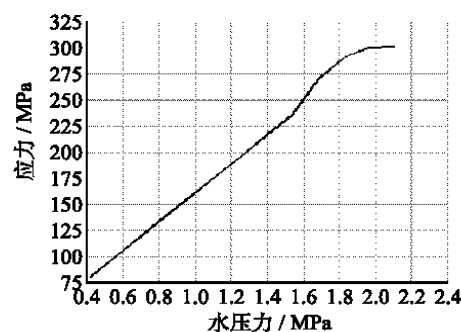


图5 水压力下钢衬管(管顶)环向应力曲线

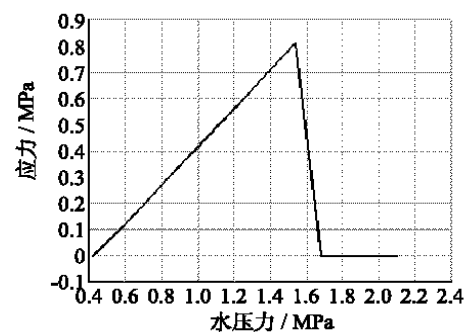


图6 水压力下混凝土管(外缘)管顶环向应力曲线

当内水压力较小时,由于钢衬管与混凝土之间存在间隙,荷载全部由钢衬承担,而当荷载增加到一定值时,钢衬完成自由变形与混凝土完全接触而共同承受荷载.因此钢衬钢筋混凝土压力钢管工作可分为两个阶段:第一阶段($0 \text{ MPa} < P < 0.42 \text{ MPa}$)钢衬单独承受荷载,钢衬的环向应力逐渐增大,其应力符合弹塑性理论经典公式计算结果;第二阶段($0.42 \text{ MPa} < P < 1.68 \text{ MPa}$)钢衬与混凝土完全接触,钢衬与钢筋混凝土联合承载,在联合承载时,混凝土经历了弹性、塑性、开裂3个过程.

钢衬管承载比例系数与内水压力的关系如图7所示.钢衬管承载比例系数指钢衬管和外包混凝土联合承载时钢衬的应力与仅有钢衬管单独承载时的钢衬应力的比值.随着内水压力的增加,钢衬管的承载比例系数呈现先下降后上升至平缓

再下降的趋势。联合承载经历以下 4 个过程：
 ① $0.42 \text{ MPa} < P < 1.54 \text{ MPa}$ ，钢衬管与外包混凝土联合承载；
 ② $1.54 \text{ MPa} < P < 1.68 \text{ MPa}$ ，外包混凝土开始产生裂缝并急剧开裂；
 ③ $1.68 \text{ MPa} < P < 1.82 \text{ MPa}$ ，外包混凝土完全开裂，钢筋参与承载；
 ④ $P > 1.82 \text{ MPa}$ ，钢衬管进入屈服状态，承载比例明显下降。

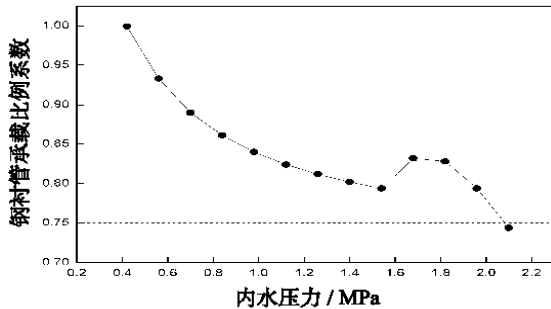


图7 钢衬管承载比例系数与内水压力关系曲线图

3 钢衬钢筋混凝土管道参数化有限元分析

3.1 钢衬管厚度对管道受力的影响

钢衬钢筋混凝土压力管道在受水压荷载时，钢衬管承担了大部分的水压，因此对钢衬管的分析尤为重要。本文研究了钢衬管厚度对钢衬钢筋混凝土压力管道受力的影响，研究中分别取钢衬管厚度为 20、23、26、30、32 和 35 mm。

钢衬管厚度对钢衬管和外包混凝土的应力曲线如图 8 和图 9 所示，钢衬管承载比例系数与钢衬管厚度的关系曲线如图 10 所示。

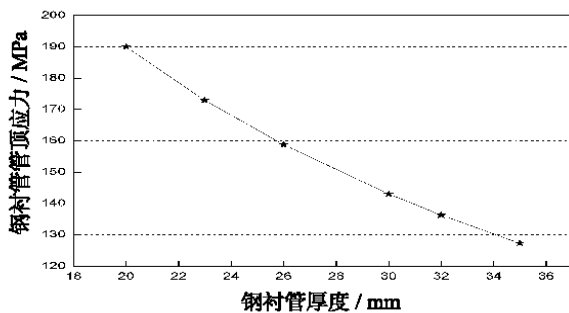


图8 钢衬管厚度与钢衬管(管顶)环向应力关系曲线图

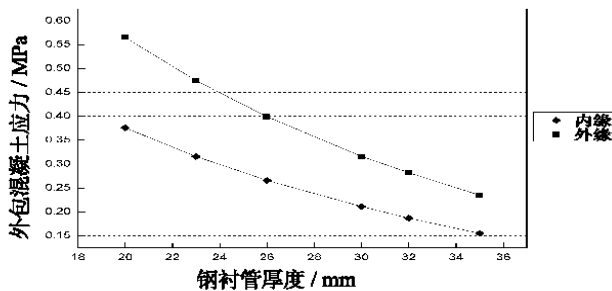


图9 钢衬管厚度与外包混凝土环向应力关系曲线图

随着钢衬管厚度的增加，钢衬管的环向应力明显减小，外包混凝土的环向应力也明显减小。

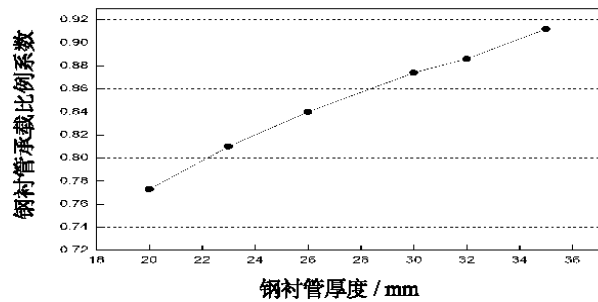


图10 钢衬管承载比例系数与钢衬管厚度关系曲线图

从图 10 中可以看出，钢衬管厚度的增加使钢衬管的承载比例系数增加，且外包混凝土的环向应力降低，这样对钢衬钢筋混凝土管道受力是有利的。但是由于增加钢衬管厚度会大大增加压力管道的造价，在设计中应特别注意。

3.2 钢衬与混凝土之间的间隙对管道应力的影响

钢衬与混凝土之间的间隙（以下称为间隙）值是坝内管承受内压和外压计算中的重要参数之一，由于间隙值是个不确定的值，在施工期及运行期都不是固定的，而是一直在变化的参数，并且间隙值是个不均匀的值，在结构的不同位置可能会有不同的间隙值。但间隙对钢衬钢筋混凝土管道的受力有一定影响，且在设计中是不容忽视的。因此本文给出几个不同的间隙值，从而找出间隙对钢衬钢筋混凝土管道的受力影响。

间隙值对钢衬管和外包混凝土的应力关系曲线如图 11 和图 12 所示。

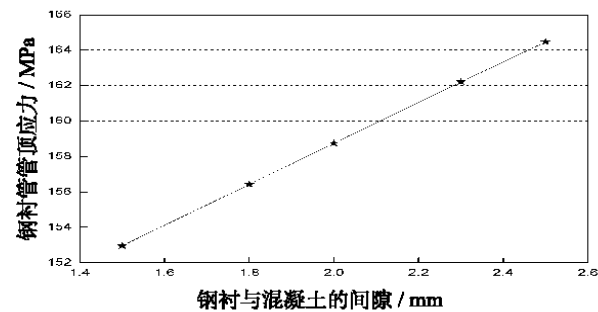


图11 间隙与钢衬管(管顶)环向应力关系曲线图

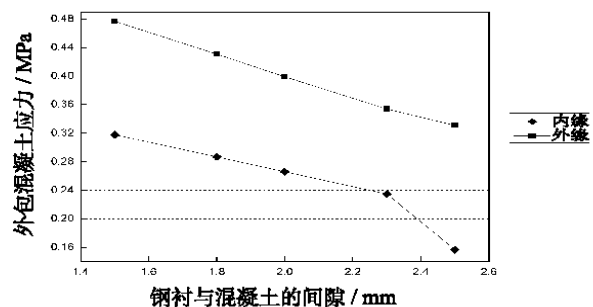


图12 间隙与外包混凝土环向应力关系曲线图

随着间隙值的增大，钢衬管的环向应力也在增大，外包混凝土管的环向应力在逐渐减小。间

隙值的增大,使钢衬管能更多地承担了内水压力,这对钢衬钢筋混凝土压力管道的设计是有利的,因为这样就能更充分发挥钢衬管抗拉性能,即充分发挥了钢材的性能。

3.3 垫层对管道应力的影响

近年来国内外在坝内大直径埋管中采用设置软垫层的坝内埋管形式。设置垫层的坝内埋管,由于垫层将钢管和坝体隔开,使管内水压力的绝大部分由钢管承受,减少了传至坝体混凝土的内水压力。垫层管的钢管用垫层材料将钢管与外围

混凝土隔开,垫层材料相对钢管和混凝土很软,能充分地吸收钢管在内水压力作用下的径向位移^[6]。本文研究了垫层的厚度和弹性模量对钢衬钢筋混凝土受力的影响,垫层厚度分别取 20、30、40、50 和 60mm,垫层弹性模量为 1.0、2.0、3.0 和 4.0MPa。

垫层厚度对钢衬管和外包混凝土的应力曲线如图 13 和图 14 所示。

垫层弹性模量对钢衬管和外包混凝土的应力曲线如图 15 和图 16 所示。

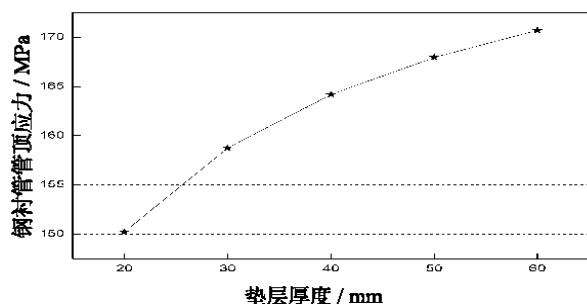


图 13 垫层厚度与钢衬管(管顶)环向应力关系曲线图

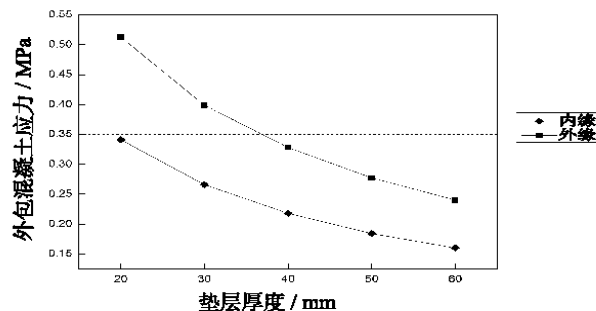


图 14 垫层厚度与外包混凝土环向应力关系曲线图

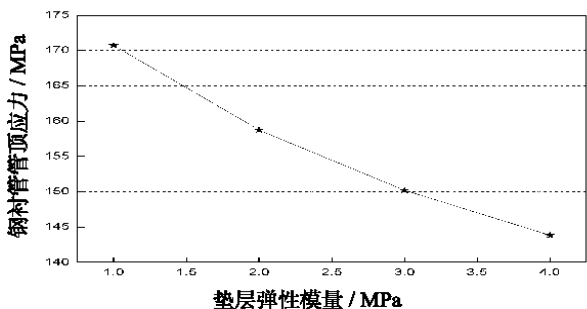


图 15 垫层弹性模量与钢衬管(管顶)环向应力关系图

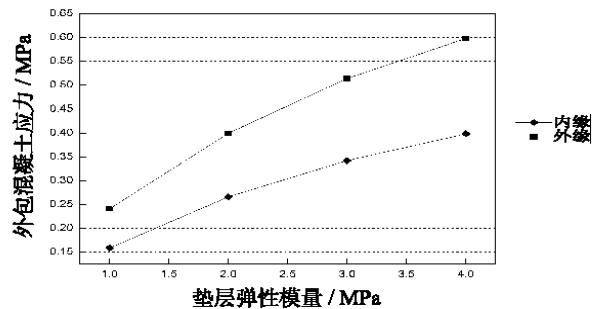


图 16 垫层弹性模量与外包混凝土环向应力关系图

增加垫层的厚度与增加间隙值的大小有着相似的作用,而增大垫层的弹性模量有着相反的作用。增加垫层厚度或减小垫层的弹性模量,都更

有利于发挥钢衬管的作用。对比不同垫层参数的 4 个关系曲线图,得出的结果见表 2。

表 2 不同垫层厚度、弹性模量下钢衬管和外包混凝土应力

垫层厚度 / mm	垫层弹性模量 / MPa	钢衬管应力 / MPa	外包混凝土应力 (内缘) / MPa	外包混凝土应力 (外缘) / MPa	垫层弹性模量与厚度比 / (MPa/mm)
20	2.0	150.21	0.341	0.513	0.1000
60	2.0	170.70	0.160	0.240	0.0333
30	1.0	170.72	0.159	0.241	0.0333
30	3.0	150.21	0.342	0.514	0.1000

从表 2 中可看出,当垫层的弹性模量与垫层厚度比值一定时,钢衬管和外包混凝土的应力状态基本相同。因此,垫层弹性模量和垫层厚度对管道应力分布的影响可以综合反映成一个参数的影响,即垫层弹性模量与垫层厚度的比值,这个比值越小,越有利于发挥钢管的作用,降低混凝土应力。因此垫层对钢衬钢筋混凝土压力管道的影响,主要与其弹性模量与厚度的比值有关,比

值越小,钢衬管能承担的内水压力就越大,越能发挥钢材性能。

3.4 外包混凝土厚度对管道应力的影响

钢衬钢筋混凝土压力管道的外包混凝土厚度是管道结构设计时需要考虑的内容,管道的外包混凝土主要是作为发生事故破坏时的防护性结构。根据工程经验和施工要求,外包混凝土厚度取值多在 1.0~2.0m,三峡水电站坝后背管外包

混凝土厚度为 2.0 m. 本文取外包混凝土厚度为 1、1.5、2、2.2 和 2.5 m 对压力管道在内水压力的受力影响及承载比进行分析.

外包混凝土厚度对钢衬管和外包混凝土的应力曲线如图 17 和图 18 所示.

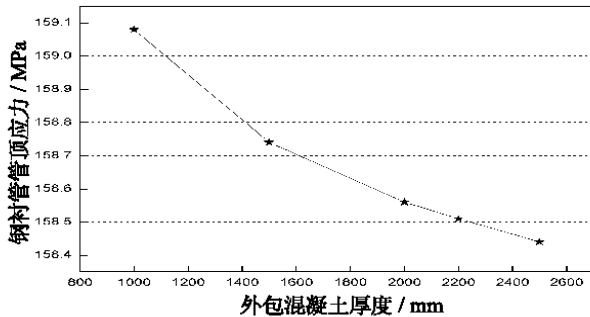


图 17 外包混凝土厚度与钢衬管(管顶)环向应力关系曲线图

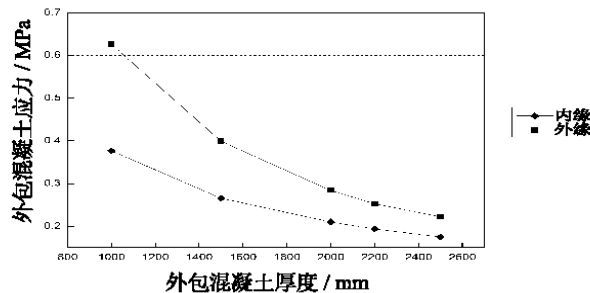


图 18 外包混凝土厚度与外包混凝土(管顶)环向应力关系曲线图

随着外包混凝土厚度的增加,外包混凝土的应力不断减少,钢衬管的应力也不断减少,但减少幅度很小,因此通过改变混凝土的厚度来改善钢衬管的应力是不理想的.

4 结论

(1) 在计算模型中用空隙来模拟钢管和垫层之间的缝隙,并用接触单元模拟它们之间的受力,既能够传递法向压力又能传递切向摩擦力,

很好地模拟了钢衬管与垫层的相互作用及受力,提高了计算精度.

(2) 计算中使用钢材和混凝土的非线性本构关系,对压力管道进行了“全过程仿真”,这对压力管道极限状态受力计算及研究有着重要作用.

(3) 对钢衬钢筋混凝土压力管道的受力进行计算.结果表明,压力管道在水压力增大过程中压力管道受力分两个阶段,其中,联合承载为四个过程.这对压力管道在正常工作运行和水压力增大时压力管道的安全性判断有很大帮助.

(4) 对钢衬钢筋混凝土压力管道的参数化计算分析结果表明,钢衬管厚度和间隙值对钢衬管承载力有很大的影响,并得出弹性垫层对钢衬管承载力影响的一个综合参数是弹性模量与厚度的比值,而外包混凝土厚度对钢衬管承载力影响很小.这为钢衬钢筋混凝土压力管道的设计提供了可靠的依据.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. SL281-2003 水电站压力钢管设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] 伍鹤皋,生晓高,刘志明. 水电站钢衬钢筋混凝土压力管道[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [3] 伍鹤皋,张金强. ANSYS 在钢衬钢筋混凝土压力管道分析中的应用[J]. 武汉大学学报:工学版,2006,39(1): 35-38.
- [4] 陆新征,江见鲸. 利用 ANSYS Solid 65 单元分析复杂应力条件下的混凝土结构[J]. 建筑结构,2003, 33(6): 22-24.
- [5] 董哲仁. 钢筋混凝土非线性有限元法原理与应用[M]. 北京:中国铁道出版社,1993.
- [6] 姬栋宇,孟闻远,姬栋丽. 水电站钢衬钢筋混凝土坝后背管结构的非线性有限元分析[J]. 华北水利水电学院学报,2007, 28(2):30-32.

Non-linear Finite Element Analysis of Steel Lined Reinforced Concrete Penstock

ZHANG Hong-jun¹, SI Yan-fei²

(1. Chongqing Jiangong Civil Construction Group Bridge Engineering Co., Ltd., Chongqing 400060, China;

2. School of Economics and Administration, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Adopts contact element and consider the nonlinearity of material, through the three-dimensional finite element parametric analysis on steel lined reinforced concrete penstock, obtains the results that the contact element makes a good interaction between the steel lined pipe and the cushion. The influence of various parameters to the penstock are obtained with parametric analysis, to provide reference to precision design of penstock.

Key words: steel lined reinforced concrete; parametric and finite element analysis; nonlinearity; APDL

(责任编辑:曾婷)