

# 螺栓连接变电构架柱结构分析

朱爱珠<sup>1</sup>, 郭耀杰<sup>2</sup>, 程超<sup>3</sup>, 胡小龙<sup>3</sup>

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北武汉 430074; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北武汉 430072; 3. 中南电力设计院, 湖北武汉 430071)

**摘要:**与传统焊接 A 字变电构架柱相比, 新型构架柱螺栓连接柱头各构件关联体小, 工厂加工、运输和安装较简单, 尤其是镀锌难度和镀锌成本能大幅度地降低, 整体经济性较好。运用有限元分析方法, 研究了螺栓连接构架柱的柱高、根开与柱高比值、管壁厚度等因素对构架柱整体刚度和强度的具体影响, 为螺栓连接的新型构架柱结构设计和优化提供了有利的理论依据。

**关键词:** A 字构架柱; 螺栓连接; 结构分析; 有限元; 变电站

**中图分类号:** TU 391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2008)01-0072-05

## Structural Analysis of the Bolting Truss-column of Substation

ZHU Ai-zhu<sup>1</sup>, GUO Yao-jie<sup>2</sup>, CHENG Chao<sup>3</sup>, HU Xiao-long<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Compared with the traditional welding truss-column in shape of A, the members of the bolting top-joint are much smaller than the common welding joint. Furthermore, the members are more convenience on fabrication, transportation and installation. It should be noted that the zinc process is much easier and cheaper. In this paper, by using the finite element method, the effect of many factors to the global stiffness and the intensity of the bolting truss-column are analyzed; the factors include the column height, the root width to column height ratio, the tube thickness, etc. The results obtained are favorable references for design and optimization of the bolting truss-column of substation.

**Keywords:** truss-column in shape of a, bolting, structural analysis, finite element, substation

合理的螺栓连接变电构架柱能满足传统焊接构架柱的设计刚度和强度的要求<sup>[1,2]</sup>, 文献[1]中以某 500 KV 变电站 28 m 构架柱的设计条件为依据, 详细分析了螺栓连接柱头节点中, 盖板、顶板和竖板厚度以及螺栓数量和布置等因素对构架柱整体刚度和强度的影响, 并提出了相应的局部优化设计建议。实际上, 顶部各板件和螺栓等局部因素对构架柱整体的影响相对较小, 构架柱结构整体刚度和强度的主要因素可能是柱高、管壁厚度或根开与柱高比值等。因此, 本文运用有限元分析方法, 对螺栓连接构架柱整体刚度和强度的主要影响因素展开了具体的研究。

### 1 构架柱有限元模型

参考某 500 kV 变电站 28 m 焊接构架柱的设计条件, 利用构架柱结构的对称性, 用有限元软件 ANSYS 建立构架柱 1/2 模型: (1) 建立 28 m 螺栓连接构架柱模型 LSZ1-28, 柱头立面如图 1。盖板、顶板、竖板厚度分别为 16 mm、16 mm、12 mm, 各板螺栓布置、水平肋板高度等如图 2 所示(取各板件得 1/2)。管壁厚 8 mm, 钢管外径 480 mm, 两钢管腿轴线夹角 12°; 顶部水平和竖向加劲肋板厚度分别为 8 mm、10 mm, 竖向肋板高度 300 mm。螺栓为 8.8 级高强螺栓 M20, 孔径

\* 收稿日期: 2007-10-15

基金项目: 中南电力设计院电顾科技[2006]64 号项目

作者简介: 朱爱珠(1981-), 女, 博士后, 主要从事建筑钢结构的研究工作, (E-mail) zhuai Zhu1228@163.com。

为 22 mm。(2)保持根开与柱高比值( $=2\tan 6^\circ$ )及 2 道横向支撑所分成的三段柱高间比例不变,分别建立螺栓连接构架柱总高度为 24 m、32 m、36 m 和 44 m 模型 LSZ1-24、LSZ1-32、LSZ1-36 和 LSZ1-44。(3)改变构架柱根开与柱高比值为  $2\tan 5^\circ$ ,即两管腿轴线夹角为  $10^\circ$ ,建立 28 m 模型 LSZ'-28。(4)管壁厚度取 10 mm,建立 28 m 构架柱模型 T10-28。(5)建立 28 m 焊接构架柱模型 HJZ,其盖板和竖板厚度均为 16 mm,宽度为 580 mm,长度同螺栓连接的构架柱。

由于构架梁连接于构架柱盖板和顶板两端各 4 个螺孔处(图 1 和图 2),所以构架柱顶板竖向位移通常比较大,尤其是盖板、顶板或竖板厚度较小时,竖向位移占总位移的比例相当大。在焊接构架柱中,当构架柱设计荷载作用较大时,往往在顶板和柱腿间增设与竖向加劲肋板(图 4 中②)。若在螺栓连接构架柱柱顶同样增设该加劲肋板,可减小顶部竖向位移,以致减小柱顶总位移,最后达到提高构架柱整体刚度的目的。因此,建立增设肋板②的 28 m 构架柱模型 LSZ1-28(L),肋板②高度为 300 mm,厚度为 10 mm。

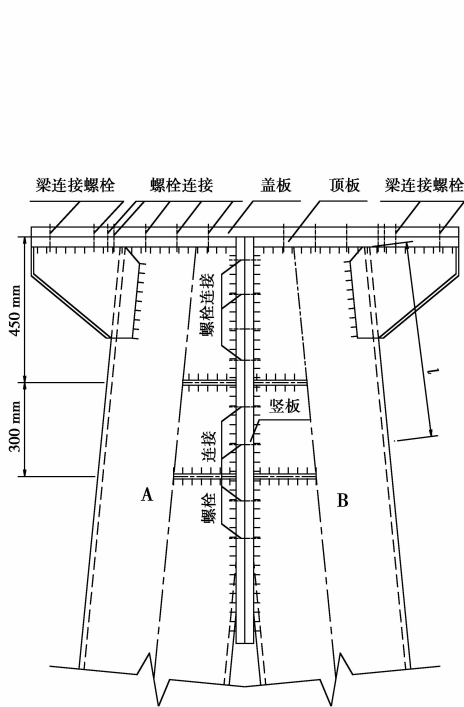


图 1 螺栓构架柱柱头立面图

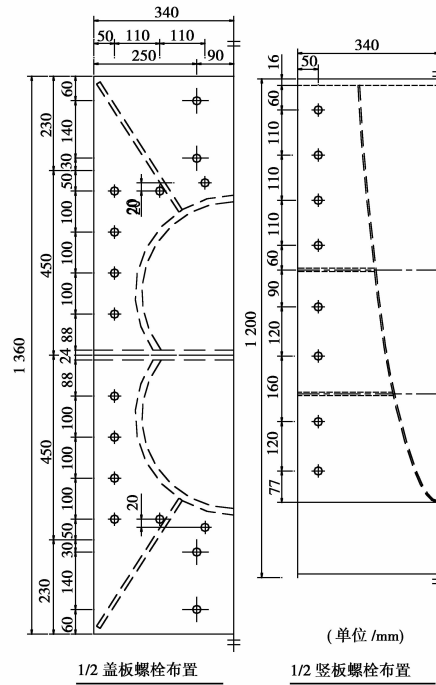


图 2 盖板及竖板螺栓布置图

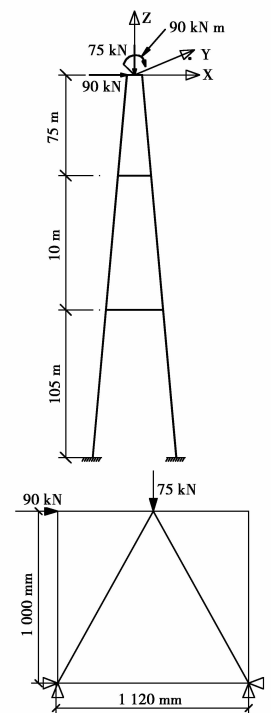


图 3 设计荷载简化图面和目标面<sup>[6,7]</sup>

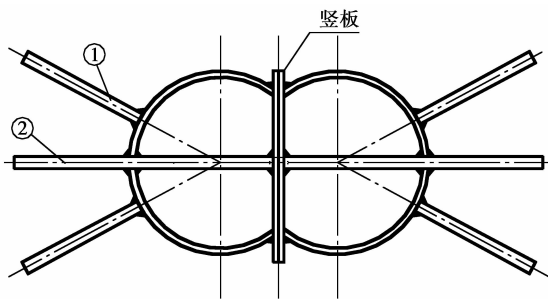


图 4 构架顶部近顶板处横剖面简图

模型对称面上施加对称约束<sup>[3,4]</sup>,底部为固定约束。高强螺栓的螺杆、螺母和螺帽粘结一体,螺母、螺帽分别与被连接的板件粘结,忽略垫圈作用。高强螺栓各尺寸参考文献<sup>[5]</sup>,螺栓单元为 SOLID 185,其它单元为 SOLID 45。盖板和顶板间、两竖板板间的接触分别用接触对模拟,用三维八节点的面-面接触单元 CONTA 174 和目标单元 TARGE 170 分别模拟接触

面和目标面<sup>[6,7]</sup>,螺杆中部通过 PSMESH 命令生成三维预拉伸单元 PRETS 179 来施加预拉力。模型中 SOLID 45 单元屈服强度和弹性模量取文献[1]中材料试验值,分别为 250 MPa 和 203 000 MPa;SOLID 185 单元屈服强度为 660 MPa<sup>[8-10]</sup>,弹性模量均为  $2.06 \times 10^5$  MPa;材料泊松比均为 0.28。材料均为各向同性,采用 Von - Mises 屈服准则,材料屈服后用关联流动理论和随动强化准则<sup>[11]</sup>。接触面的抗滑系数取 0.2,最大摩擦应力  $\tau_{\max} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} = \frac{250}{\sqrt{3}} = 144.34$  MPa。计算中柱顶盖板处的设计荷载作用简化成计算高度为 1 m 的水平荷载和竖向荷载作用(图 3)。两个铰支座分别位于盖板两端各 4 个螺孔的中心(图 2),将支座反力反向施加在相应位置的单元节点上得到模型计算荷载作用。图 3 中,90 kN+75 kN(水平荷载+竖向荷载)称为设计相当荷载作用。

## 2 构架柱高度、柱腿管厚及根开与柱高比值的影响

分析中选取构架柱顶部最大总位移  $DMX$ 、顶板竖向位移相对值  $\Delta Z$  作为刚度控制条件,其中  $DMX = \max(UX^2 + UY^2 + UZ^2)^{0.5}$ ,  $\Delta Z = \max(|UZ_+ - UZ_-|)$ ,  $UX$ 、 $UY$ 、 $UZ$  分别表示  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的位移,下标“+”“-”分别表示竖向向上和竖向向下,坐标系见图3;选取受压侧柱腿 Von-Mises 应力(下称应力)最大值为强度控制条件,称该位置为应力控制点,根据文献[1],该点距柱腿与顶板焊缝外侧  $l \approx 300$  mm(图1)。同时,为了分析不同荷载组合比(水平荷载与竖向荷载的比值)时构架柱位移和应力情况,计算中取两种作组合比即 1.2 和 1.5。

图5、图6分别为各构架柱顶部最大总位移  $DMX$ 、柱腿控制应力  $\sigma_v$  与荷载作用中水平荷载  $F_h$  的

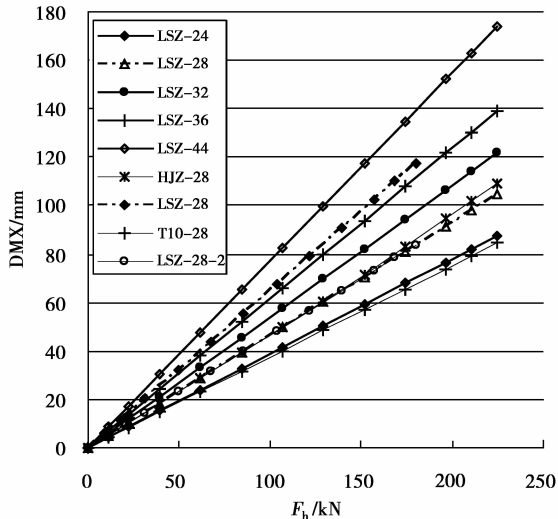


图5 顶部  $DMX-F_h$  曲线

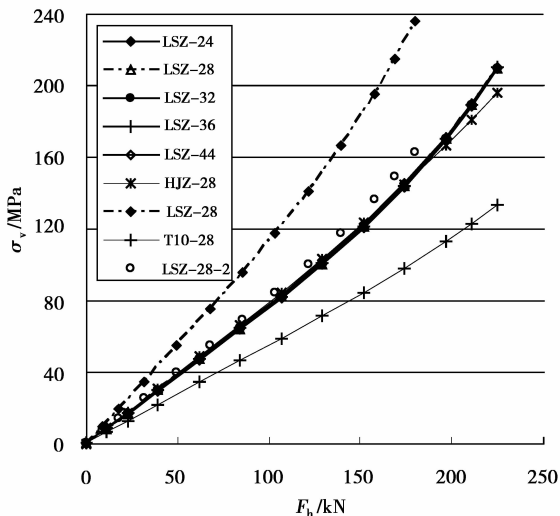


图6 控制应力  $\sigma_v-F_h$  曲线

关系曲线,相应竖向荷载  $F_v$  略。其中,LSZ-28-2 的模型与 LSZ-28 相同。LSZ'-28 和 LSZ-28-2 曲线中,荷载组合比为 1.2,其它均为 1.5。表1为各构架柱刚度和强度控制值及其比较分析结果,其中,  $F_h + F_v$  表示荷载作用值;  $[f] = H/200$  [12],表示构架柱挠度限值,式中柱高  $H$  的单位取 mm。

表1 刚度和强度控制值比较

编号	构架柱	$DMX/mm$	$\frac{DMX}{DMX_3}$	$\frac{DMX}{[f]}$	$\Delta Z/mm$	$\sigma_v/MPa$	$F_h + F_v/kN$
1	HJZ-28	109.37	1.04	0.78	50.77	196.17	
2	LSZ-24	87.69	0.84	0.73	22.36	209.46	
	LSZ-28	104.71	1.00	0.75	22.50	209.90	
4	LSZ-32	121.84	1.16	0.76	22.61	210.13	225+150
5	LSZ-36	139.15	1.33	0.77	22.67	210.32	
6	LSZ-44	173.93	1.66	0.79	22.99	210.55	
7	T10-28	84.48	0.81	0.60	19.53	133.50	
8	LSZ-28	83.82	0.80	0.60	17.68	163.11	180+150
9	LSZ'-28	117.44	1.12	0.84	22.93	236.08	

通过分析表1中各值及图5、图6中的  $DMX$ 、 $\sigma_v$  的曲线,可以得出各值的变化规律,从而得到高度、柱腿管厚及根开与柱高比值对构架柱整体刚度和强度的影响。

(1)仅改变构架柱高度时,顶部最大总位移  $DMX$  随高度增大而增加,与构架柱 LSZ-28 相比,  $DMX$  的增加百分比与高度增量呈近似线性变化,即直至高度增大至 44 m 时,高度每增大 4 m,  $DMX$  增大约 16%,但各构架柱的比值  $DMX/[f]$  仍然非常接近,  $\Delta Z$  和  $\sigma_v$  值随高度的变化也很小,高度的改变对控制位移和应力的影响都很小。因此,保证根开与柱高比值而仅改变柱高时,对构架柱整体刚度和强度的影响很小。

(2)当柱腿管厚由 8 mm 增大至 10 mm,构架柱整体刚度和强度的各控制值变化较大。其中,荷载作用为 225 kN+150 kN 时,模型 T10-28 的顶部  $DMX$  值比 LSZ-28 减小约 20%;  $\Delta Z$  减小约 13.2%; 柱腿控制应力  $\sigma_v$  减小 36.4%。因此,构架柱柱腿管厚对构架柱的整体刚度和强度的影响均比较大,且对强度的影响要大于对刚度的影响。

(3)当根开与柱高比值由  $2\tan 6^\circ$  减小到  $2\tan 5^\circ$  时,构架柱刚度和强度的各控制值变化亦较大。其中,荷载作用为 180 kN+150 kN 时,LSZ'-28 顶部  $DMX$

值比 LSZ-28 增大约 40%; $\Delta Z$  值比 LSZ-28 增大约 29.7%; $\sigma_v$  值比 LSZ-28 增大约 44.7%。因此,根开与柱高比值是构架柱整体刚度和强度最重要的影响因素之一。

(4)与 LSZ-28 中的 DMX 值和  $\sigma_v$  值相比,HJZ-28 中 DMX 值较大而  $\sigma_v$  值稍小,但相差百分比约 5%,因此,LSZ-28 与 HJZ-28 的整体刚度和强度是基本相当的。此外,从图 5 和图 6 还可以看出,荷载组合比对 DMX 值的影响大于对  $\sigma_v$  值的影响,但总体影响都较小。

综上所述,螺栓连接构架柱与传统焊接构架柱的整体刚度和强度基本相当;螺栓构架柱根开与高度比值、柱腿管厚是构架柱整体刚度和强度的主要影响因素,其中,根开与柱高比值的影响最大;仅改变构架柱高度对构架柱整体刚度和强度的影响很小,可以忽略。

### 3 增设竖向加劲肋板的影响

表 2 为增设顶部对称面处竖向肋板前后,各构架柱刚度和强度控制值比较。表中,LSZ/HJZ 表示前一系列中螺栓柱与焊接柱相应控制值的比值;括号中的值为增设肋板后与增设前螺栓柱中相应值的比值。

表 2 构架柱刚度和强度控制值比较

构架柱	180+150 /kN					
	DMX/mm	LSZ/HJZ	$\Delta Z$ /mm	LSZ/HJZ	$\sigma_v$ /MPa	LSZ/HJZ
HJZ	87.05	—	36.75	—	159.79	—
LSZ-28	83.82	0.963	17.68	0.481	163.11	1.021
LSZ-28(L)	82.96	0.953	9.34 (0.53)	0.254	152.06 (0.93)	0.952
构架柱	225+150/kN					
	DMX/mm	LSZ/HJZ	$\Delta Z$ /mm	LSZ/HJZ	$\sigma_v$ /MPa	LSZ/HJZ
HJZ	109.37	—	50.77	—	196.17	—
LSZ-28	104.71	0.957	22.50	0.443	209.88	1.070
LSZ-28(L)	103.68	0.948	11.67 (0.52)	0.230	181.31 (0.86)	0.924

分析表 2 中的数据,增设肋板②对构架柱的影响可以从整体刚度和强度两个方面概括。

刚度方面:(1)增设肋板后,顶部竖向相对位移  $\Delta Z$  值大大减小,其减小量最大达未设该肋板相应值的 50%以上;(2)当荷载组合比增大时, $\Delta Z$  的减小量增大;(3)增设肋板后,构架柱顶部 DMX 值的变化规

律与  $\Delta Z$  相同,但由于总位移中顶部水平位移 UX 占 DMX 的比重较大,因而增设该肋板对 DMX 的影响不及对  $\Delta Z$  的影响明显。

强度方面:(1)未设肋板时,LSZ-28 的柱腿控制应力比 HJZ-28 的应力大,且当荷载作用为 225 kN+150 kN 时,超出焊接构架柱应力值达 20%;增设肋板后,两种荷载作用时,LSZ-28(L)应力值都小于 HJZ-28 的应力值;(2)与增设肋板前相比,柱腿控制应力减小量最大达 14%左右。计算结果中还发现,增设肋板后构架柱各处的应力集中也有明显改善。

因此,从刚度和强度两方面的控制值分析,增设肋板②既有利于大幅度提高构架柱的竖向刚度,从而增大构架柱整体刚度,又有利于改善构架柱的应力分布,提高构架柱的承载能力。

### 4 结论

通过对柱高、柱腿管壁厚度、根开与柱高比值及顶部竖向加劲肋等因素的模拟分析,得到了各因素对构架柱整体刚度和强度的影响,以及各因素影响程度的相对大小关系,为新型螺栓连接构架柱的结构设计及结构优化提供了理论依据。主要结论可概述如下:

1)根开与柱高比值是构架柱整体刚度和强度的最重要影响因素。当根开与柱高比值由  $2\tan 60^\circ$  减小到  $2\tan 50^\circ$ ,顶部总位移和柱腿控制应力分别增大约 40%和 45%。

2)柱腿管壁厚度也是构架柱整体刚度和强度的重要影响因素。管壁厚度由 8 mm 增大至 10 mm,顶部总位移和柱腿控制应力分别减小约 20%和 36%。

3)增设顶部对称面处竖向加劲肋板,不仅可以使最大总位移和柱腿控制应力减小,还可以改善各构件的应力分布,可以有效提高构架柱整体刚度和强度。

4)仅改变构架柱高度时对构架柱整体刚度和强度的影响都很小,可以忽略。

5)螺栓连接构架柱与传统焊接构架柱的整体刚度和强度基本相当,LSZ-28 的用钢量超出 HJZ-28 用钢总量(约 6 440 kg)3.28%左右。

因此,螺栓连接变电构架柱由于柱头构件体积小,有效解决了工厂加工、镀锌、运输和安装难等现实问题,具有较好的经济性,建议在输变电工程中推广使用。

## 参考文献:

- [1] 朱爱珠. 螺栓连接变电构架的试验研究与分析[D]. 武汉: 武汉大学土木建筑工程学院, 2007.
- [2] 郭耀杰, 朱爱珠, 程超, 等. 某500kV变电构架新型柱头节点的试验研究[C]. 第四届海峡两岸及香港钢结构技术交流会论文集. 上海:《建筑钢结构进展》编辑部, 2006.
- [3] 龚曙光, 谢桂兰. ANSYS操作命令与参数化编程[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [4] 小飒工作室编. 最新经典ANSYS及Workbench教程[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [5] 樊兆馥. 机械设备安装手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2004.
- [6] 张亚欧, 谷志飞, 宋勇, 等. ANSYS 7.0有限元分析实用教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [7] 姜勇, 张波. ANSYS 7.0实例精解[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [8] 沈祖炎. 钢结构制作安装工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.
- [9] 罗邦富, 魏明钟, 沈祖炎, 等. 钢结构设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1989.
- [10] 李春胜, 黄德彬. 金属材料手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [11] 薛守义. 弹塑性力学[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2005.
- [12] 中南电力设计院. 变电构架设计手册[S]. 武汉:湖北科学技术出版社, 2006.

(编辑 胡玲)

(上接第71页)

值仿真在几何模型准确、材料与边界条件设置恰当、初始状态与荷载给定准确的情况下,对试验起到了较好的验证作用。在实体模型试验中,沟岸受泥石流流体冲击作用后具有的滞后性和累计效应,以及在模型试验中观测到泥石流流体过弯流速分布规律,在数值仿真动态影像中得到了体现。

## 4 结 语

1)根据流固耦合原理,建立了泥石流三维数值仿真几何模型、流体模型与流固耦合模型。将流体数模中的 $k-\epsilon$ 模型引入流固耦合三维数值仿真中,对泥石流岸坡耦合进行了数值仿真,为进一步深入模拟流固耦合提供了一定的理论依据。

2)通过对天山公路K630泥石流沟的流固耦合作用的三维数值仿真,得到了泥石流流体与沟岸耦合作用的基本方式,即三维链式冲击作用规律。通过对固体域中应力极值点与流体域中流速极值点的跟踪对比分析,揭示了沟岸对泥石流作用的响应具有滞后性。

3)在泥石流流体与沟岸耦合三维数值仿真过程中,数值仿真数据与泥石流沟岸实体模型试验中取得的结果吻合较好,从而验证了实体模型试验所得结果。

## 参考文献:

- [1] 陈洪凯,唐红梅,马永泰,等. 公路泥石流研究及治理[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei, CHEN Ye-ying. Research on methods of calculate velocities of solid phase and liquid phase in debris flow [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(3): 399-408.
- [3] CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei, WU Si-fei. Research on abrasion of debris flow to high-speed drainage structure [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(11): 1257-1264.
- [4] 刘儒勋,舒其望. 计算流体力学的若干新方法[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [5] K. J. Bathe. ADINA Theory and Modeling Guide[M]. ADINA R & D. Inc. USA.
- [6] K. J. Bathe, H. Zhang, S. Ji. Finite element analysis of fluid flows fully coupled with structural interactions [J]. Computers and Structures, 1999 Volume 72, 8: 1-16.
- [7] K. J. Bathe. Finite element method [M]. Berlin, Springer, 2002.

(编辑 胡玲)