

# 泰州大桥悬索桥南锚碇基础的变形及超载安全度分析

葛玉梅<sup>1</sup>, 邵帅<sup>1</sup>, 潘辉<sup>2</sup>, 胡丰<sup>2</sup>

1. 西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031

2. 河海大学力学与材料学院, 南京 210098

**摘要** 锚碇作为悬索桥的主要承力结构物,其变形是影响悬索桥安全的重要因素。针对泰州大桥悬索桥的南锚碇基础,建立了三维的地层-结构模型,应用大型数值软件 Flac3D 和超载分析法,假定锚碇的超载为大缆拉力按比例增加,研究了锚碇基础的变形随大缆拉力超载系数的变化规律。结果表明,在大缆拉力为设计载荷,即大缆拉力超载系数  $\lambda=1$  时,数值模拟计算结果与现场实测结果接近;在超载情况下,当  $\lambda<3.5$  时,锚碇基础最大变形随大缆拉力超载系数基本呈线性增加;当  $\lambda>3.5$  时,锚碇基础变形随大缆超载系数呈非线性增加;而当  $\lambda=3.81$  时,锚碇基础的水平位移达到极限值。因此,综合考虑锚碇基础的土体塑性区分布和变形控制要求,得到了泰州大桥悬索桥南锚碇基础的超载安全度为 3.81 的结论,可为泰州大桥工程的稳定性评价提供参考依据。

**关键词** 悬索桥;锚碇基础;变形;超载安全度

中图分类号 TU311.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.26.004

## Deformation and Safety Analysis of Taizhou Suspension Bridge South-Anchor Foundation Under Surcharge

GE Yumei<sup>1</sup>, SHAO Shuai<sup>1</sup>, PAN Hui<sup>2</sup>, HU Feng<sup>2</sup>

1. School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China

**Abstract** The anchor foundation is the main bearing structure of suspension bridges and its deformation and stability are very important issues. For the south-anchor foundation of the Taizhou Bridge, the stratum and structure model of three-dimensional is established. Using large-scale numerical software Flac3D and surcharge analysis method, the deformations of the anchor foundation with different surcharge coefficients are studied based on the assumption that the values of surcharge are changed proportionally with the cables tension. The results show that the values of numerical simulation are close to the measured values under the design value of the cable tension. The linearly increasing relationship between the maximum deformation of anchorage foundation and value of the surcharge coefficient is obtained when the surcharge coefficient is less than 3.5. The nonlinearly increasing relationship between the maximum deformation of anchorage foundation and value of the surcharge coefficient is obtained when the surcharge coefficient is greater than 3.5. When the value of the surcharge coefficient is 3.81 times of the design value of the cables tension, the maximum horizontal displacement of the anchor foundation reaches the limit value. Based on the soil plastic zone distribution range and deformation control requirements of the anchorage foundation, the numerical value of surcharge safety for the south-anchor foundation of the Taizhou suspension bridge is 3.81. The reference conclusions for the stability evaluation of the Taizhou bridge project are provided.

**Keywords** suspension bridge; anchor foundation; deformation; surcharge safety

### 0 引言

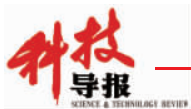
泰州公路大桥为中国第一座 3 塔 2 跨悬索桥,桥跨布置

为 390m+1080m+1080m+390m,位于江苏省境内,北接江苏省泰州市,南接扬中,桥位上游距润扬长江公路大桥 66km,下游

收稿日期: 2013-04-22; 修回日期: 2013-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278169)

作者简介: 葛玉梅,教授,研究方向为工程力学与桥梁工程,电子邮箱: wangge@home.swjtu.edu.cn; 邵帅(同为第一作者),硕士研究生,研究方向为工程力学与桥梁工程,电子邮箱: vicky-ss@163.com



距江阴长江公路大桥 57km。由于锚碇承受巨大的水平力和上拔力,并且受力过程复杂而多变,经过多阶段多方案的反复论证和比较,最终确定采用矩形沉井基础方案<sup>[1]</sup>。锚碇作为悬索桥主要的承力结构物,锚碇体的受力机制是将作用在悬索桥主缆上的巨大拉力通过索股与锚碇架分散传到锚块上,再由锚碇基础通过摩擦力传递到地基上,以地基的反力来抵抗锚碇基础和索股拉力在竖直方向的分量,而索股在水平方向的巨大拉力则主要由锚碇基础与地基的摩擦力抵抗。鉴于锚碇系统在悬索桥中的重要性,沉井基础的变形和稳定问题也就显得十分重要。

在 20 世纪 60 年代以前,锚碇基础的稳定性分析无论是针对直接基础,还是沉井、沉箱等基础,锚碇基础的滑移、下沉以及在主缆竖向分力作用下发生倾倒,都是绝对不允许的<sup>[2]</sup>。从 1964 年美国建成韦拉扎诺桥开始,悬索桥锚碇可以搁在软质地基上,允许下沉,严格限制滑动,尽量减少倾覆量。按照目前设计规范要求,锚碇基础的水平位移和垂直位移必须控制在允许的范围之内<sup>[3-5]</sup>。近年来,在工程问题的稳定性评价方面,郑颖人<sup>[6,7]</sup>、罗强<sup>[8]</sup>等基于超载法评价边坡的稳定性,给出了超载储备安全系数;Lee<sup>[9]</sup>、王汉鹏<sup>[10]</sup>等利用超载试验结合数值模拟方法,探讨了隧道的超载安全度;张国祥<sup>[11]</sup>等基于 Hoek Brown 非线性破坏准则,结合极限分析中的上限理论,研究了岩土体的变形及承载特性;邹爱清等<sup>[12]</sup>基于综合分析方法,利用模型试验结合数值计算,对隧道锚与围岩的变形机制、时效特征及超载安全性等进行了研究。苏静波<sup>[13]</sup>、冯兆祥<sup>[14]</sup>等基于有限元数值模拟的结果,探讨了锚碇基础的基底接触面摩擦强度指标对抗滑稳定性的敏感性。本文针对泰州大桥南锚碇基础,应用 Flac3D 数值软件及超载分析方法,研究悬索桥锚碇基础的变形特征和超载安全度。

## 1 计算模型

### 1.1 工程概况

南锚碇沉井基础尺寸为 67.5m×52m×41m,基底标高为 -39.0m,位于厚度 200m 的深厚覆盖层上<sup>[14]</sup>,承受主缆拉力为 430MN。南锚碇前沿至长江大堤堤脚的距离为 142m,过渡墩至大堤堤脚的距离为 15m。

根据场区地质水文条件,南锚碇基础设计为矩形沉井。南锚碇沉井分为 8 节,第 1 节为钢壳混凝土沉井,高 8m;第 2 至 8 节均为钢筋混凝土沉井,除第 7 节为 3m 外,其余均为 5m。沉井顶面标高为 +2.0m,基底标高为 -39m,基底置于密实的粉细砂层。沉井为普通钢筋混凝土结构,共分为 20 个井孔,沉井第 3 节及以上各节的井壁厚 2m,隔墙厚 1.4m。上锚体为大体积混凝土结构,分为 4 块,每块分层浇筑。为了使锚碇基础基底应力在恒载作用下受力趋于均匀,将锚碇偏心于基础中心,后锚体与沉井平齐。

沉井基础的立面布置如图 1 所示,平面布置如图 2 所示。

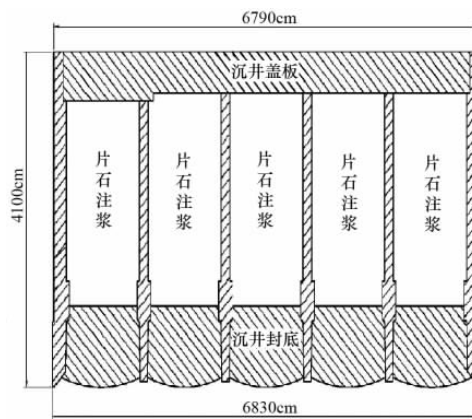


图 1 南锚碇基础立面布置

Fig. 1 Vertical arrangement of south anchorage foundation

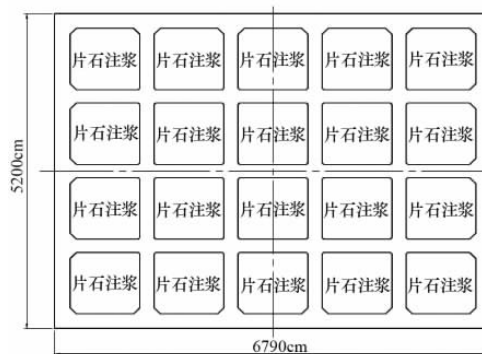


图 2 南锚碇基础平面布置

Fig. 2 Plane arrangement of south anchorage foundation

混凝土材料参数为:弹模  $2.55 \times 10^4 \text{MPa}$ ,泊松比 0.167,密度  $2.55 \text{g/cm}^3$ ;钢材料参数为:弹模  $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ ,泊松比 0.3,密度  $7.8 \text{g/cm}^3$ 。土层物理力学性质指标采用该工程的试验结果,列于表 1。

表 1 土层物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil

土层名称	天然含水量/%	天然密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	试验孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
淤亚黏土	41.1	1.77	1.161	18.5	8.2	3.6
亚黏土	31.7	1.90	0.881	22.8	14.4	6.3
亚砂土	28.7	1.94	0.754	11.0	33.9	9.5
粉砂	29.8	1.88	0.823	3.6	31.0	13.0
粉砂	26.7	1.92	0.752	4.1	33.0	18.4
粉砂	28.9	1.91	0.780	5.2	34.3	18.0
中砂	17.7	2.12	0.404	4.0	38.0	28.0
砾砂	13.0	2.10	0.385	5.0	41.2	30.0
粉砂	26.4	1.88	0.720	3.6	34.5	27.0
中砂	17.9	2.05	0.435	3.0	38.0	30.0
砾砂	16.0	2.02	0.494	4.5	40.0	35.0
粉砂	17.0	1.95	0.550	5.0	37.0	27.0

### 1.2 计算模型与材料模型

计算域的范围,在基坑竖直方向,坑底以下约取基坑深度的3倍,取至坚硬土层;在坑外水平方向,向坑外延伸取对应基坑长边或短边长度的3倍。计算模拟了锚碇-基础-土体的共同作用,沉井和土体采用三维六面体8结点等参元,挡墙与土骨架之间设接触面单元模拟二者之间的相互作用。整体计算模型经离散后,单元总数为48020,结点总数为55704,基本模拟了基坑结构特征、岩(土)体结构及接触面情况,同时模拟了沉井和锚碇结构等。计算采用直角坐标系, $x$ 轴平行于基坑长边指向泰州, $y$ 轴平行于基坑短边, $z$ 轴垂直向上。三维整体计算网格如图3所示,沉井基础网格如图4所示。

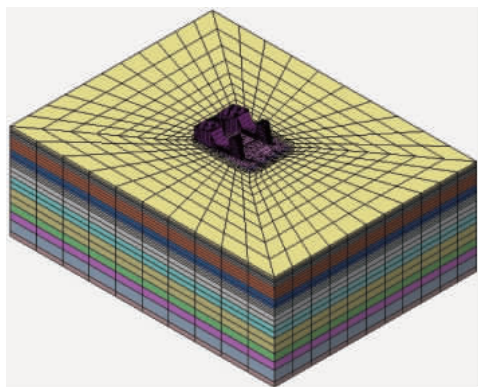


图3 三维整体计算网格  
Fig. 3 3D computation mesh

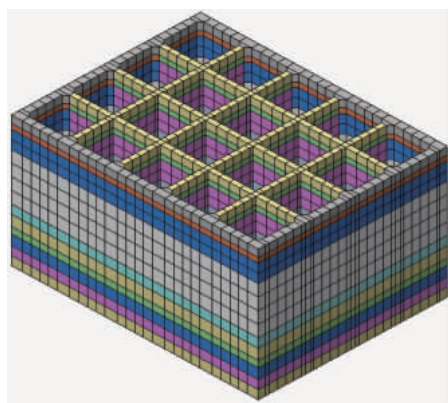


图4 沉井基础网格  
Fig. 4 Mesh of caisson foundation

土体采用M-C弹塑性模型,塑性流动采用相关联的流动法则,沉井、锚碇体采用脆弹性材料模型。假定接触面无拉应力,剪切破坏服从Mohr-Coulomb屈服准则。

### 2 计算方法

采用国内外近年来通用的大型数值软件Flac3D,经二次开发后,对该锚碇体系建立了三维的地层-结构模型。南锚碇下部基础和顶板浇筑完工后,上锚碇开始浇筑,同时考虑在上锚碇浇筑施工过程中进行仿真计算。

#### 2.1 锚碇基础的变形计算方法

锚碇基础的变形计算,其数值计算主要针对锚碇大缆加载过程的模拟,加载期初始位移以锚碇基础完工为基础。大缆拉力设计载荷为430MN,与水平方向成 $20.175^\circ$ 夹角,大缆加载过程采用增量逐级加载。

#### 2.2 锚碇基础的超载分析方法

应用数值分析方法,确定锚碇的变形和锚碇基础土体的塑性区分布。采用超载方式,使系统达到极限平衡状态,超载的倍数即为安全度,从而得到超载稳定安全度。该方法需要根据某种破坏判据人为判定系统是否进入极限平衡状态,系统达到极限平衡状态的判据称为失稳判据,它属于弹塑性极限平衡分析的范畴。

按照锚碇设计规范要求,锚碇基础的位移必须满足《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)的要求,即在主缆拉力作用下,锚碇的水平位移和垂直位移必须控制在允许的范围。泰州大桥的悬索桥为3塔2跨,其中主跨的跨径为1080m,按照规范要求,锚碇基础的水平位移极限值为18cm,沉降极限值为20cm。以锚碇基础的位移极限值作为确定锚碇体超载安全度的判据。

超载分析的计算模型和材料参数与正常荷载下相同,同时考虑岩土体的非线性。假定锚碇的超载为大缆拉力按比例增加,即可采用大缆拉力超载方式进行锚碇体的超载分析。首先设大缆拉力为设计荷载时的超载系数 $\lambda=1.0$ ;然后以大缆拉力设计荷载乘以大于1的 $\lambda$ 值( $\lambda=1.0, 1.5, 2.0, \dots$ )进行加载和模拟计算,当大缆拉力超载使得锚碇基础的位移达到极限值时,所对应的 $\lambda$ 值即为超载安全度。

### 3 计算结果分析

#### 3.1 成桥满载情况下锚碇基础的变形

在成桥满载情况下,应用Flac3D程序进行数值计算,得到在大缆拉力为1.0倍设计荷载作用时,锚碇基础地表水平剖面的水平位移等值线如图5所示,锚碇基础垂直对称剖面的竖向位移等值线如图6所示。

在1.0倍大缆拉力设计荷载下,从图5和图6的位移等值线分布可看出,锚碇基础的前墙附近土体(大缆拉力方向)的水平位移大于后墙附近土体的水平位移。由于受大缆拉力的上拔作用,锚碇基础前墙附近土体的竖向位移为沉降(向下),而后墙附近土体的竖向位移为上抬(向上),锚碇基础沿大缆拉力方向最大水平变形为4.30cm,最大沉降位移为2.24cm,符合实际的位移变化规律。

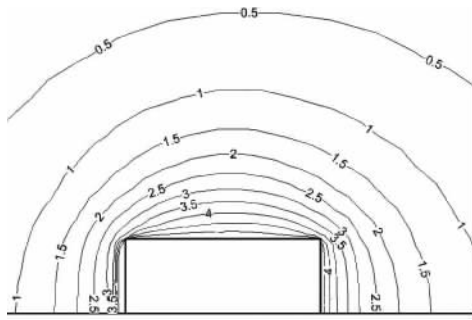


图5 在1.0倍大缆拉力下锚碇基础的水平位移(单位:cm)  
Fig. 5 Horizontal displacement of anchor foundation under the designed value of the cable tension (unit: cm)

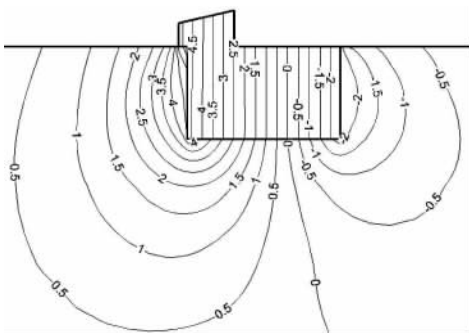


图6 在1.0倍大缆拉力下锚碇基础的竖向位移(单位:cm)  
Fig. 6 Vertical displacement of anchor foundation under the designed value of the cable tension (unit: cm)

泰州大桥南锚碇基础从2009年12月27日锚体施工完毕到2012年1月8日钢箱梁焊接完成,现场实测(即为1.0倍大缆拉力)得到的南锚碇基础增量沉降位移为2.30cm。与现场实测结果比较,表明本文的数值计算结果是合理的。

### 3.2 大缆拉力超载对锚碇基础变形的影响

以大缆拉力设计荷载乘以超载系数 $\lambda$ ( $\lambda=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, \dots$ )进行加载和数值计算,得到锚碇基础的水平位移和沉降位移与大缆拉力超载系数的关系分别如图7、图8所示。表2给出南锚碇基础的水平位移和沉降位移随大缆拉力超载系数的变化值。

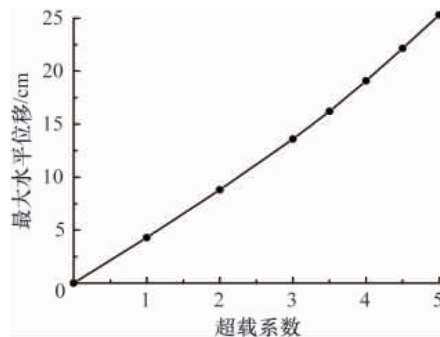


图7 最大水平位移与超载系数关系曲线  
Fig. 7 Relationship curve of the maximum horizontal displacement and surcharge coefficient

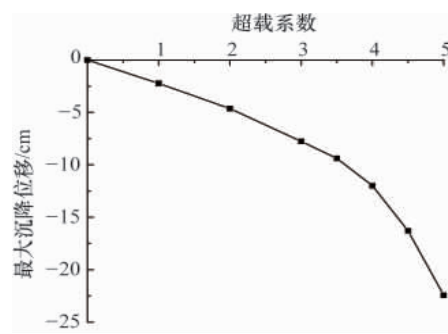


图8 最大沉降位移与超载系数关系曲线  
Fig. 8 Relationship curve of the maximum sedimentation displacement and surcharge coefficient

表2 超载情况下南锚碇基础的变形值

Table 2 Deformations of south anchorage foundation under surcharge

超载系数	水平位移/cm	沉降位移/cm
1.0	4.30	-2.24
2.0	8.80	-4.63
3.0	13.60	-7.76
3.5	16.20	-9.38
4.0	19.10	-12.00
4.5	22.15	-16.30
5.0	25.30	-22.45

当大缆超载系数 $\lambda < 3.5$ 倍时,南锚碇基础关键部位的变形随大缆超载系数基本上呈线性增加的趋势;当大缆超载系数 $\lambda > 3.5$ 倍时,南锚碇基础关键部位的变形随大缆超载系数呈非线性迅速增加。

基于图7、图8和表2的计算结果,南锚碇基础水平位移极限值达到18cm时,根据最大水平位移随大缆拉力超载系数的变化曲线进行插值可得到对应的大缆超载系数 $\lambda=3.81$ ;南锚碇基础最大沉降位移极限值达到20cm时,根据最大沉降位移随大缆拉力超载系数的变化曲线进行插值可得到对应的大缆超载系数 $\lambda=4.80$ 。由此,按照锚碇基础的变形控制要求,当大缆拉力超载系数 $\lambda < 3.81$ 时,可同时满足锚碇基础的水平位移和沉降位移的控制要求,即可得到泰州大桥南锚碇基础的大缆拉力最大超载系数为3.81。

### 3.3 大缆拉力超载对锚碇基础塑性区的影响

上部锚体浇筑完成后,在大缆拉力为1.0倍设计荷载作用下,南锚碇基础垂直对称剖面的塑性区分布如图9所示;当大缆拉力加载到3.81倍设计荷载时,南锚碇基础垂直对称剖面的塑性区分布如图10所示。

从图9和图10可看出,在大缆拉力为1.0倍设计荷载作用时,锚碇基础前后墙靠地表附近只有局部区域的土体为塑性。而在大缆拉力加载到设计荷载的3.81倍时,锚碇基础前墙土体的塑性区连成一片,导致锚碇基础变形达到规范要求

的变形控制值,因此从土体的塑性区分布范围也可得出此时锚碇基础的承载能力达到了极限值。

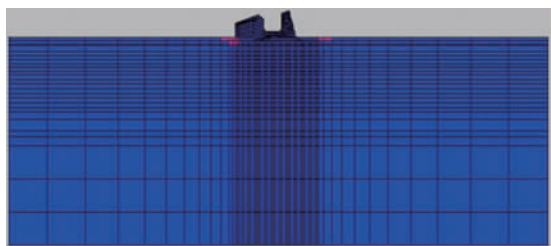


图 9 在 1.0 倍大缆拉力下锚碇基础的塑性区

Fig. 9 Plastic zone of anchor foundation under the designed value of the cable tension

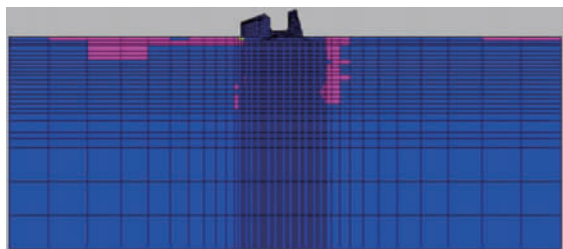


图 10 在 3.81 倍大缆拉力下锚碇基础的塑性区

Fig. 10 Plastic zone of anchor foundation under a cable tension of 3.81 times of the designed value

#### 4 结论

本文利用 Flac3D 数值分析软件,针对泰州大桥南锚碇基础建立了三维的地层-结构模型,基于数值模拟计算结果,研究了南锚碇基础在大缆拉力为设计荷载和超载作用下的承载性能,得出如下结论:

(1) 在大缆拉力为设计荷载(超载系数  $\lambda=1.0$ )作用下,南锚碇基础沿大缆拉力方向的最大水平变形计算值为 4.30cm,最大沉降位移计算值为 2.24cm;同时,在设计荷载下,现场实测得到的南锚碇基础增量沉降位移为 2.30cm,数值模拟结果与现场实测结果接近,符合实际的位移变化规律,证明了本文数值模拟方法的可行性和准确性。

(2) 在大缆拉力超载作用下,当超载系数  $\lambda < 3.5$  时,南锚碇基础最大变形随超载系数基本上呈线性增加;当大缆超载系数  $\lambda > 3.5$  时,南锚碇基础最大变形随大缆超载系数呈非线性增加。

(3) 基于超载分析方法,按照锚碇基础的最大变形控制要求,可将南锚碇基础的超载安全度确定为 3.81。该结论可为泰州大桥工程的稳定性评价提供参考。

#### 参考文献 (References)

[1] 吉林,韩大章.泰州长江大桥设计[J].现代交通技术,2008,5(3): 20-

28.  
 Ji Lin, Han Dazhang. Modern Transportation Technology, 2008, 5(3): 20-28.  
 [2] 张杰,钱冬生.大跨悬索桥塔和锚碇的合理设计[J].桥梁建设,2000(4): 20-22.  
 Zhang Jie, Qian Dongsheng. Bridge Construction, 2000(4): 20-22.  
 [3] Kim H-K, Lee M-J, Chang S-P. Non-linear shape-finding analysis of a self-anchored suspension bridge[J]. Engineering Structures, 2002, 24(12): 1547-1559.  
 [4] Wang P-H, Lin H-T, Tang T-Y. Study on non-linear analysis of a highly redundant cable-stayed bridge [J]. Computers & Structures, 2002, 80(2): 165-182.  
 [5] Chen D W, Au F T K, Tham L G, et al. Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method[J]. Computers & Structures, 2000, 74(1): 1-9.  
 [6] 郑颖人,赵尚毅.边(滑)坡工程设计中安全系数的讨论[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9): 1937-1940.  
 Zheng Yingren, Zhao Shangyi. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1937-1940.  
 [7] Zheng Y, Tang Xi, Zhao S, et al. Strength reduction and step-loading finite element approaches in geotechnical engineering[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009(1): 21-30.  
 [8] 罗强,李亮,赵炼恒.水力和超载条件下锚固岩石边坡动态稳定性拟静力分析[J].岩土力学,2010,31(11): 3585-3593.  
 Luo Qiang, Li Liang, Zhao Lianheng. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3585-3593.  
 [9] Lee C J, Wu B R, Chen H T, et al. Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(2): 119-132.  
 [10] 王汉鹏,李术才,张强勇.分岔隧道模型试验与数值模拟超载安全度研究[J].岩土力学,2008,29(9): 2521-2526.  
 Wang Hanpeng, Li Shucui, Zhang Qiangyong. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2521-2526.  
 [11] 张国祥,李丽民,张成平,等.非线性破坏准则下岩石地基承载力的影响因素[J].土木建筑与环境工程,2010,32(5): 16-22.  
 Zhang Guoxiang, Li Limin, Zhang Chengping, et al. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(5): 16-22.  
 [12] 邹爱清,彭元诚,黄正加,等.超大跨度悬索桥隧道锚承载特性的岩石力学综合研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3): 433-441.  
 Wu Aiqing, Peng Yuancheng, Huang Zhengjia, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 433-441.  
 [13] 苏静波,邵国建.悬索桥锚碇基础的稳定性分析[J].公路,2005(4): 61-65.  
 Su Jingbo, Shao Guojian. Highway, 2005(4): 61-65.  
 [14] 冯兆祥,王建.泰州长江公路大桥南锚碇基础沉降计算研究[J].桥梁建设,2010(1): 49-51.  
 Feng Zhaoxiang, Wang Jian. Bridge Construction, 2010 (1): 49-51.

(责任编辑 韩星明)