

文章编号:1006-2106(2015)07-0046-05

# 轨道约束对高铁大跨连续梁桥地震反应的影响<sup>\*</sup>

张永亮<sup>1\*\*</sup> 赵继栋<sup>2</sup> 陈兴冲<sup>2</sup> 丁明波<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学, 兰州 730070)

**摘要:**研究目的:针对 CRTS II 型板式无砟轨道体系的结构特点,以京沪高速铁路某大跨度连续梁桥为研究对象,采用线桥一体化模型讨论轨道体系对桥梁动力特性及地震反应的影响。

**研究结论:**(1)轨道约束体系可增强相邻桥跨间的纵向联系,使按传统模型分析得到的两个单独振动单元变为一个整体振动单元,随着简支梁跨数的减少,连续梁桥的纵向一阶自振周期逐渐减小;(2)采用线桥一体化模型计算的连续梁桥地震反应大于传统模型,且随着简支梁跨数的增加,地震反应增大明显,不考虑轨道体系的纵向约束效应时,连续梁桥的地震反应偏于不安全;(3)随着轨道系统伸缩刚度的降低,线桥一体化模型的计算结果越来越接近传统模型;(4)随着端刺刚度的增加,连续梁桥的地震反应逐渐减小,但当端刺刚度大于一定值时,对连续梁桥的地震反应几乎无影响;(5)该研究结果可为多遇地震下高速铁路桥梁抗震计算模型的修订提供依据。

**关键词:**高速铁路;连续梁桥;地震反应;线桥一体化模型;轨道约束

**中图分类号:**U442.5 **文献标识码:**A

## Influence of Track System Restraint on Seismic Response of High-speed Railway Long-span Continuous Girder Bridge

ZHANG Yong-liang<sup>1</sup>, ZHAO Ji-dong<sup>2</sup>, CHEN Xing-chong<sup>2</sup>, DING Ming-bo<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract: Research purposes:** According to structural characteristics of the CRTS II slab ballastless track system, taking a long-span continuous girder bridge on the Beijing-Shanghai high-speed railway as research object, the influence of track system on dynamic characteristics and seismic response of the bridge is discussed based on the rail-bridge model.

**Research conclusions:** (1) The track constraint system enhances longitudinal connection between adjacent bridges, two separate vibration unit obtained by traditional model analysis get into a whole vibration unit. With the decrease in number of simply-supported girder, longitudinal natural vibration period of the continuous girder bridge decreases. (2) For the continuous girder bridge, seismic response analyzed by the rail-bridge model is greater than that of the traditional model. With the increase in the number of simply-supported girder, seismic response increases significantly. No considering longitudinal stiffness of track constraint system, seismic response of the continuous girder bridge will be apt to be unsafe. (3) With the decrease of axial stiffness of track system, calculation results by using the rail-bridge model is more and more close to that of the traditional model. (4) With the increase of axial stiffness of end spine, seismic response of the continuous girder bridge gradually reduces. But when the end spine stiffness is greater than a certain

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-05-27

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51468031, 51368034); 长江学者和创新团队发展计划资助(IRT1139); 甘肃省高等学校基本科研业务费项目(213051)

<sup>\*\*</sup> 作者简介:张永亮,1975 年出生,男,副教授。

value, seismic response of continuous girder bridge is almost no change. (5) The research result may provide a basis for revision of computational models of the high-speed railway bridge under frequent earthquake.

**Key words:** high-speed railway; continuous girder bridge; seismic response; rail-bridge model; track system restraint

## 1 引言

我国地处世界两大地震带——环太平洋地震带和欧亚地震带之间,为地震最活跃的国家之一。四纵四横高速铁路网也大多位于高烈度地震区,因而地震作用往往控制高速铁路桥梁下部结构的设计<sup>[1]</sup>。鉴于地震动的随机性,《铁路工程抗震设计规范》<sup>[2]</sup>(以下简称《震规》)实行了多级抗震设防理念,即“三水准设防”,要求在多遇地震作用下,震后桥梁不损坏或轻微损坏,能保持其正常使用功能,桥梁处于线弹性工作状态。为了保证桥梁在多遇地震下的抗震性能,必须准确分析桥梁在预计地震动作用下的结构内力。目前,高铁桥梁普遍采用结构整体性较好的纵连板式无砟轨道。由于纵连板式无砟轨道系统纵桥向轴向刚度较大,增强了动力特性不同的各跨桥梁间下部结构地震反应的耦联性,使高铁桥梁的地震反应变得更加复杂。然而,我国高铁桥梁的抗震设计仍主要参考2009年版《震规》,该规范仅给出了适用于有砟桥面简支梁桥抗震分析的单墩力学模型及全桥力学模型。同时,在简支梁桥全桥力学模型中尽管提出了可以考虑桥面系刚度,但规范并未给出该刚度的取值方法。

目前,轨道系统纵向约束对桥梁动力特性及地震反应的影响,已经取得了较多的研究成果<sup>[3-7]</sup>。但这些研究主要针对传统有砟轨道体系简支梁桥在罕遇地震下的地震反应,而对于采用纵连板式无砟轨道的大跨度连续梁桥在多遇地震下的地震反应涉及较少。大跨度连续梁桥是我国高速铁路建设中广泛使用的桥型之一,这种桥型大多采用“多跨一联”的结构形式,在一联桥跨中通常仅设置一个制动墩。在地震作用下,由于上部结构的惯性力主要由制动墩承担,因此制动墩必须满足强度及延性的要求。对制动墩地震反应的精确分析关系到整联桥的抗震安全性。

本文针对高速铁路广泛应用的CRTS II型板式无砟轨道体系的构造特点,提出了线桥一体化分析模型。以京沪高速铁路大跨度连续梁桥为研究对象,采用线桥一体化模型分析了CRTS II型无砟轨道体系对连续梁桥弹性地震反应的影响,并与传统抗震计算模型(不考虑轨道约束)的分析结果进行了比较。

## 2 CRTS II型无砟轨道及有限元建模

### 2.1 CRTS II型无砟轨道结构

桥上CRTS II型板式无砟轨道由钢轨、弹性扣件、

轨道板、砂浆调整层、连续底座板、滑动层、侧向挡块等部分组成,如图1所示。台后路基上设置摩擦板、端刺及过渡板,梁缝处设置硬泡沫塑料板。在梁体固定支座附近,底座板与梁体采用剪力齿槽连接。底座板、轨道板连续铺设,贯通全桥,不存在板缝。

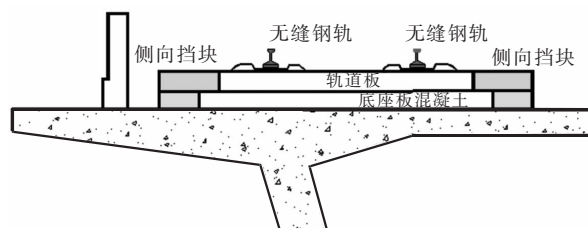


图1 CRTS II型板式无砟轨道

### 2.2 有限元建模

针对CRTS II型无砟轨道体系的结构特点,提出了线桥一体化分析模型,如图2所示。在该模型中将钢轨、轨道板与底座板3部分集成为一个整体截面,采用梁单元模拟。剪力齿槽采用刚度为 $1.0 \times 10^7$  kN/m的纵向线性弹簧模拟<sup>[8-9]</sup>。端刺的纵向刚度取 $1.0 \times 10^7$  kN/m<sup>[10]</sup>,桥台与端刺之间铺设的摩擦板长度按100 m考虑,则端刺与摩擦板串联后的刚度为 $7.6 \times 10^5$  kN/m,端刺构件采用纵向线性弹簧模拟。支座采用约束主从自由度的方法模拟,忽略活动支座的摩擦效应。考虑邻跨简支梁桥的边界效应,进行全桥建模。

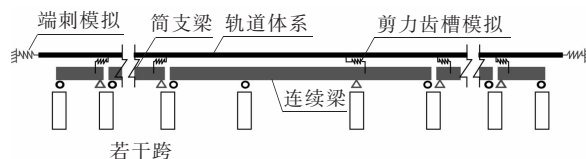


图2 线桥一体化模型

为了与线桥一体化分析模型对比,本文还按传统抗震计算模型进行了分析,传统抗震模型只需将线桥一体化模型中的轨道体系刚度给一较小值即可。

## 3 工程概况及分析方法

### 3.1 工程概况

京沪高速铁路某大桥主桥为(80+128+80) m双线连续箱梁桥,如图3所示。主梁采用单箱单室截面,箱梁顶板宽13.4 m,底板宽7.0 m,跨中梁高为5.6 m,中墩处梁高为9.6 m,梁底按二次抛物线型渐变。下部

结构为圆端形实体桥墩(纵、横向尺寸分别为 4.5 m、11.6 m),基础为钻孔灌注桩(24 根  $\phi$ 1.5 m,桩长 73 m)。采用盆式橡胶支座,32<sup>#</sup>墩为制动墩。桥上二期恒载为 210 kN/m。主桥两侧引桥为 32 m 混凝土简支箱梁桥,主梁采用单箱单室截面,梁高 3.08 m。墩身为矩形重力式桥墩(纵向×横向尺寸为 2.5 m×6.0 m),墩高为 15.5 m,基础为钻孔灌注桩(8 根  $\phi$ 1.25 m、桩长 40 m)。桥上二期恒载为 120 kN/m。支座采用球形钢支座。

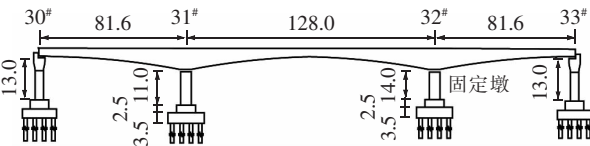


图 3 连续梁桥立面布置(单位:m)

3.2 分析方法

3.2.1 特征值分析

结构自振特性分析是进行结构地震反应分析的基础,本文采用子空间迭代法求解结构的自振周期及振型。

3.2.2 反应谱分析

反应谱曲线采用文献[2]中给出的动力放大系数  $\beta$  曲线,场地类别取 II 类,特征周期分区为二区,多遇地震水平地震基本加速度  $\alpha = 0.07g$ 。反应谱分析时,振型数采用前 300 阶,振型组合采用 CQC 方法。

4 简支梁跨数对连续梁桥动力特性的影响

简支梁跨数对连续梁桥纵向一阶振型自振周期的影响如表 1 所示,典型的振型如图 4~图 5 所示。

表 1 简支梁跨数对结构动力特性的影响

分析模型	简支梁跨数	纵向一阶振型自振周期/s	
		简支梁桥	连续梁桥
线桥一体化模型	30	0.771	
	20	0.770	
	10	0.764	
	5	0.755	
传统模型	—	0.747	0.891

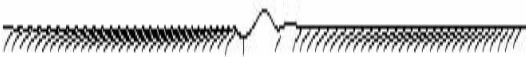


图 4 30 跨简支梁 + 连续梁线桥一体化模型振型

由表 1 及图 4、图 5 的计算结果可知:

一是,对于自振特性不同的简支梁桥及大跨连续梁桥,轨道约束体系的存在增强了相邻桥跨间的纵向



(a) 简支梁桥振型



(b) 连续梁桥振型

图 5 传统模型振型

联系,使按传统模型分析得到的两个单独振动单元(简支梁桥、连续梁桥)变为一个整体振动单元。

二是,随着简支梁跨数的减少,连续梁桥的纵向一阶自振周期逐渐减小。在连接 30 跨简支梁时,连续梁桥按线桥一体化模型计算的自振周期为传统模型的 0.86 倍。

5 轨道约束对连续梁桥地震反应的影响

5.1 简支梁跨数对地震反应的影响

取连续梁桥两侧简支梁桥的跨数分别为 5、10、20、30 跨,端刺与摩擦板串联刚度取为  $7.6 \times 10^5$  kN/m,探讨简支梁跨数对连续梁桥地震反应的影响,计算结果如图 6~图 7 所示。

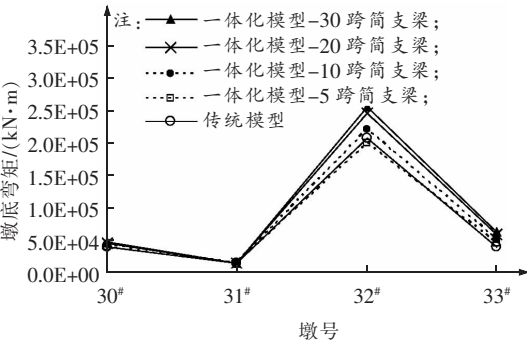


图 6 简支梁跨数对墩底弯矩的影响

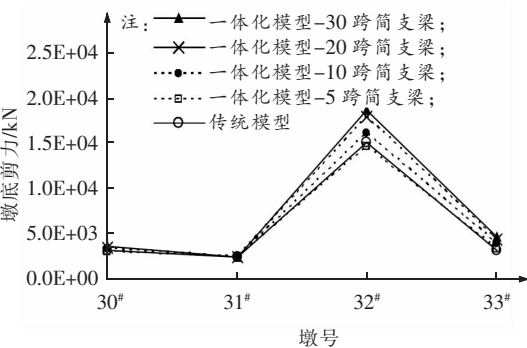


图 7 简支梁跨数对墩底剪力的影响

根据图 6、图 7 的计算结果可知:

一是,线桥一体化模型计算的连续梁桥地震反应大于传统模型。对连接 30 跨简支梁条件下,32<sup>#</sup>制动墩墩底弯矩将增大 23%。即不考虑轨道体系的纵向约束效应时,连续梁制动墩计算结果偏于不安全。

二是,随着简支梁桥跨数的减少,连续梁桥各墩的地震反应越来越接近传统模型的分析结果。原因如下:简支梁跨数减少尽管使连续梁桥的纵向一阶自振周期变短,但连续梁各墩通过轨道约束携带简支梁桥跨的质量逐渐减小。同时由于传递路径变短,部分惯性力通过端刺直接传给路基,导致连续梁各墩的地震反应逐渐减小。

## 5.2 轨道伸缩刚度对地震反应的影响

考虑到底座板与轨道板在运营过程中受温度等因素影响产生裂缝,其伸缩刚度将降低。本文将伸缩刚度按三种情况考虑:不折减、折减 30%、折减 50%。端刺与摩擦板串联刚度取为  $7.6 \times 10^5$  kN/m,简支梁按 30 跨考虑,计算结果如图 8~图 9 所示。

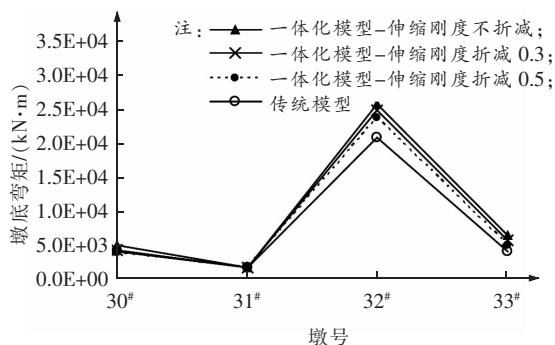


图 8 伸缩刚度对墩底弯矩的影响

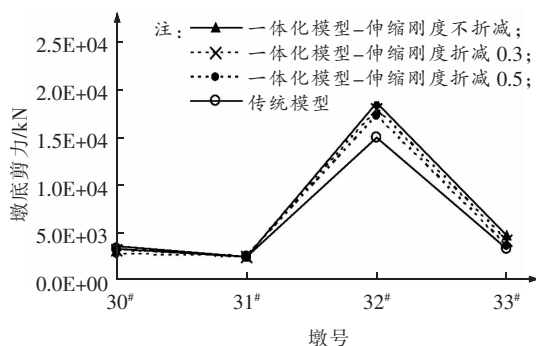


图 9 伸缩刚度对墩底剪力的影响

由图 8、图 9 的计算结果可知:随着轨道系统伸缩刚度的降低,线桥一体化模型的计算结果越来越接近传统模型。事实上,当轨道伸缩刚度为 0 时,线桥一体化模型也就变成了传统模型。以上计算结果也从侧面验证了本文提出的线桥一体化分析模型计算结果的合

理性。

## 5.3 端刺刚度对地震反应的影响

端刺纵向刚度分别取  $1.0 \times 10^7$  kN/m、 $1.0 \times 10^8$  kN/m、 $1.0 \times 10^9$  kN/m,桥台与端刺之间铺设的摩擦板长度按 100 m 考虑,则端刺与摩擦板串联后的刚度分别为  $7.6 \times 10^5$  kN/m、 $8.21 \times 10^5$  kN/m、 $8.27 \times 10^5$  kN/m。简支梁按 30 跨考虑,计算结果如图 10~图 11 所示。

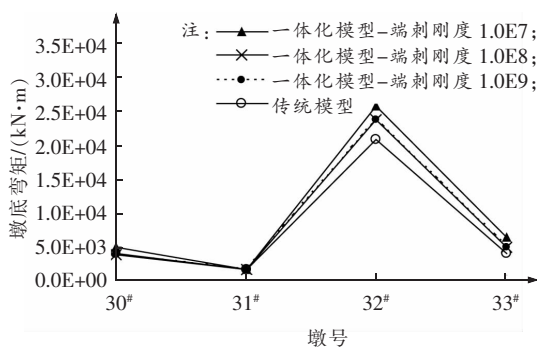


图 10 端刺刚度对墩底弯矩的影响

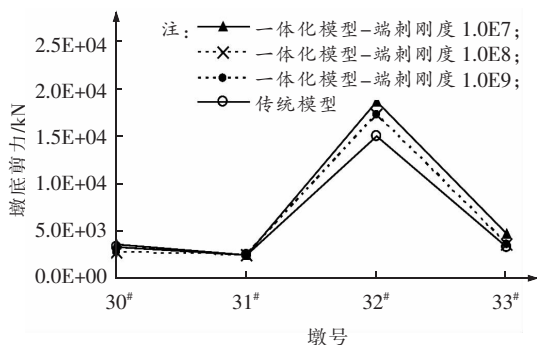


图 11 端刺刚度对墩底剪力的影响

由图 10、图 11 的计算结果可知:随着端刺刚度的增加,连续梁桥的地震反应逐渐降低。当端刺刚度大于  $1.0 \times 10^8$  kN/m 时,端刺刚度对连续梁桥地震反应几乎无影响。

## 6 结论

(1) 轨道约束体系增强了相邻桥跨间的纵向联系,使按传统模型分析得到的两个单独振动单元(简支梁桥、连续梁桥)变为一个整体振动单元,且随着简支梁跨数的减少,连续梁桥的纵向一阶自振周期逐渐减小。

(2) 采用线桥一体化模型计算的连续梁桥地震反应大于传统模型,且随着简支梁跨数的增加,地震反应增大明显。当连接 30 跨简支梁时,32<sup>#</sup>制动墩墩底弯矩将增大 23%。即不考虑轨道体系的纵向约束效应时,连续梁制动墩的计算结果偏于不安全。



(3)随着轨道系统伸缩刚度的降低,线桥一体化模型的计算结果越来越接近传统模型。

(4)随着端刺刚度的增加,连续梁桥的地震反应逐渐降低,但当端刺刚度大于一定值时,对连续梁桥的地震反应几乎无影响。

## 参考文献:

- [1] 张永亮, 陈兴冲, 丁明波, 等. 多遇地震下少筋混凝土重力式桥墩验算指标研究[J]. 铁道工程学报, 2014(11): 72-76.  
Zhang Yongliang, Chen Xingchong, Ding Mingbo, etc. Research on Checking Indexes of Concrete Gravity Type Piers with Low Longitudinal Reinforcement Ratio under a Low-level Earthquake[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(11): 72-76.
- [2] GB 50111—2006, 铁路工程抗震设计规范[S].  
GB 50111—2006, Code for Seismic Design of Railway Engineering[S].
- [3] Maragakis E M, Douglas B M, Chen Q B, etc. Full-scale Tests of a Railway Bridge[J]. Structural Analysis and Design: Bridges, Culverts, and Pipes, 1998(1624): 140-147.
- [4] 谢旭, 王炎, 陈列. 轨道约束对铁路减隔震桥梁地震响应的影响[J]. 铁道学报, 2012(6): 75-82.  
Xie Xu, Wang Yan, Chen Lie. Effect of Rail Restraints on Seismic Responses of Cushioning Railway Brides[J]. Journal of the China Railway Society, 2012(6): 75-82.
- [5] 张永亮, 陈兴冲, 李子奇. 轨道约束系统对高速铁路多跨简支梁桥地震反应的影响[J]. 世界地震工程, 2010(4): 6-12.  
Zhang Yongliang, Chen Xingchong, Li Ziqi. Effects of Rail System Restraints on Seismic Response of Multi-span Simply Supported Girder Bride on High-speed Railway[J]. World Earthquake Engineering, 2010(4): 6-12.
- [6] 黄艳, 阎贵平, 刘林. 轨道约束对铁路桥梁纵向地震反应特性的影响[J]. 铁道学报, 2002(5): 124-128.  
Huang Yan, Yan Guiping, Liu Lin. Effects of Rail Restraints on Longitudinal Seismic Response of Railway Bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2002(5): 124-128.
- [7] 闫斌, 戴公连, 徐庆元. 行波效应下铁路简支梁桥梁轨系统地震响应[J]. 振动工程学报, 2013(3): 357-362.  
Yan Bin, Dai Gonglian, Xu Qingyuan. Seismic Responses of Railway Track-bridge System under Travelling Wave Effect[J]. Journal of Vibration Engineering, 2013(3): 357-362.
- [8] 陈令坤, 蒋丽忠, 余志武. 无砟轨道约束对高速铁路列车-桥梁系统地震响应的影响[J]. 计算力学学报, 2013(6): 763-769.  
Chen Lingkun, Jiang Lizhong, Yu Zhiwu. Influence of Ballastless Track Constraint on the Seismic Responses of High-speed Railway Train-bridge System[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013(6): 763-769.
- [9] 严猛, 魏贤奎, 王平, 等. 大跨桥上无缝线路纵向地震响应研究[J]. 铁道学报, 2014(5): 96-102.  
Yan Meng, Wei Xiankui, Wang Ping, etc. Research on Longitudinal Seismic Responses of Continuous Welded Rails on Large-span Bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2014(5): 96-102.
- [10] 魏强, 赵国堂, 蔡小培. CRTS II 型板式轨道台后锚固结构研究[J]. 铁道学报, 2013(7): 90-95.  
Wei Qiang, Zhao Guotang, Cai Xiaopei. Study on Anchor Structure behind the Abutment for Slab Track CRTS II[J]. Journal of the China Railway Society, 2013(7): 90-95.
- [11] 孙文, 吴亚平, 蔺鹏臻, 等. 次生不良冻土对路基稳定性影响的数值分析[J]. 铁道工程学报, 2013(11): 7-12.  
Sun Wen, Wu Yaping, Lin Pengzhen, etc. The Numerical Analysis of the Impact of the Secondary Harmful Frozen Soil on the Subgrade Stability[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013(11): 7-12.
- [12] 陈庆中, 张弥, 冯星梅. 应力场、渗流场和流场耦合系统定边值定初值问题的变分原理[J]. 岩石力学与工程学报, 1999(5): 497-502.  
Chen Qingzhong, Zhang Mi, Feng Xingmei. The Variational Principle for Problems of Fluid Flow Through Poremedia with Fixed Boundary and Initial Conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999(5): 497-502.
- [13] 孙文, 吴亚平, 蔺鹏臻, 等. 次生不良冻土对路基稳定性影响的数值分析[J]. 铁道工程学报, 2013(11): 7-12.  
Sun Wen, Wu Yaping, Lin Pengzhen, etc. The Numerical Analysis of the Impact of the Secondary Harmful Frozen Soil on the Subgrade Stability[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013(11): 7-12.
- [14] 陈庆中, 张弥, 冯星梅. 应力场、渗流场和流场耦合系统定边值定初值问题的变分原理[J]. 岩石力学与工程学报, 1999(5): 497-502.  
Chen Qingzhong, Zhang Mi, Feng Xingmei. The Variational Principle for Problems of Fluid Flow Through Poremedia with Fixed Boundary and Initial Conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999(5): 497-502.
- [15] 龚道勇. 三维稳定饱和一非饱和渗流场的有限元分析及应用[D]. 南京: 河海大学, 2002.  
Gong Daoyong. The Analysis and Application of Seepage Field on Three-dimensional Stable Seepage[J]. Nanjing: Hohai University, 2002.
- [16] 罗启北, 郝方, 肖良锦, 等. ANSYS 在渗流场动态分析中的应用[J]. 贵州水力发电, 2005(1): 68-71.  
Luo Qibei, Hao Fang, Xiao Liangjin, etc. The Application of ANSYS on Seepage Field[J]. Guizhou Water Power, 2005(1): 68-71.

(上接第 28 页 From P. 28)