

# 嘎隆拉隧道最小注浆堵水层厚度的动态优化研究

王 辉<sup>1</sup>, 赵文娟<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 资源与土木工程系, 山东 泰安 271019; 2. 泰山职业技术学院 建筑工程系, 山东 泰安 271019)

**摘 要:**结合西藏嘎隆拉隧道施工中出现的严重突水、涌水灾害,应用 ABAQUS 中的动态仿真技术,依据流固耦合理论,对注浆堵水层厚度进行优化研究。计算结果表明,当厚度超过 3 m 时,隧道断面排水量低于 150 m<sup>3</sup>/d,并基本趋于一致。计算结果应用于嘎隆拉隧道工程施工中,取得了良好的堵水效果。

**关键词:**嘎隆拉隧道;突涌水;注浆;动态仿真;流固耦合理论

中图分类号:U459.4

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)05-0083-07

## Dynamic Optimization Research on the Minimum Thickness of Grouting Layer for Blocking Water in Galongla Tunnel

Wang Hui<sup>1</sup>, Zhao Wenjuan<sup>2</sup>

(1. Department of Resources and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Taian, Shandong 271019, China; 2. Department of Building Engineering, Taishan Polytechnic, Taian, Shandong 271019, China)

**Abstract:** An optimization research was conducted on the thickness of grouting layer for blocking water based on the technique of dynamic simulation in ABAQUS and the fluid-solid coupling theory with the case study of the serious disaster of water inrush in the construction of Galongla tunnel in Tibet. The results show that when the thickness is more than 3 m, the water discharge of tunnel section is less than 150 m<sup>3</sup>/d and tends to be consistent. The calculation results have been applied to the Galongla tunnel engineering construction and achieved a positive effect for water plugging.

**Key words:** Galongla tunnel; water inrush; grouting; dynamic simulation; fluid-solid coupling theory

近年来,随着人们对自然环境保护意识的提高,对突水、涌水隧道工程中的治水方法逐渐由以往的“以排为主”转化到“以堵为主,防堵结合”上来,隧道注浆技术得到快速发展和应用<sup>[1-4]</sup>。而注浆圈参数的确定作为“堵水限排”的核心问题<sup>[5]</sup>,是注浆堵水方案成败的关键。何红忠等<sup>[6]</sup>提出从隧道涌水量和围岩稳定性方面综合考虑确定注浆加固圈参数,并结合安全系数法,利用 FLAC 软件对围岩稳定性进行数值仿真,得出合理的注浆层参数。李鹏飞等<sup>[7]</sup>结合厦门翔安海底隧道建设,采用理论分析和数值模拟方法揭示注浆加固圈参数的变化对隧道渗水量和衬砌外水压力的影响规律,提出海底隧道复合衬砌合理注浆加固圈参数的确定方法。张成平等<sup>[5]</sup>分析了隧道排水率与衬砌外水压力之间的关系,提出确定注浆圈合理参数的方法和程序,并给出圆梁山隧道注浆圈的合理参数值。陈俊儒<sup>[8]</sup>采用有限差分程序,对青岛胶州湾海底隧道 F4-4 断层破碎带进行了数值模拟,系统分析了注浆圈厚度对围岩渗流场、应力场、位移场、破坏区的影响规律,给出海底隧道注浆圈合理参数的选取方法。汪优等<sup>[9]</sup>结合青岛胶州湾海底隧道工程计算注浆圈对渗流场的影响,认

收稿日期:2014-01-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51409154,41372289);山东省自然科学基金项目(ZR2012EEM030);山东科技大学人才引进科研启动基金项目

作者简介:王 辉(1982—),男,山东滨州人,讲师,博士,主要从事岩石力学与工程及地下工程方面的教学与研究工作。

E-mail:wanghui2004315@163.com

为注浆圈堵水效果与其厚度相关,且注浆圈厚度与其渗透系数成正比。

西藏嘎隆拉隧道由于受区域地质构造影响强烈,隧道内次生构造、节理、裂隙发育,且次生构造、节理、裂隙与山体表面、隧道两侧冰川、隧道洞口冰壶沉积区贯通,地下水十分发育。当隧道掘进至 625 m,总出水量已达 20 000 m<sup>3</sup>/d 左右(图 1,图 2),严重影响工程施工及安全。

本研究以西藏嘎隆拉隧道施工中出现的严重突水、涌水灾害问题为背景,基于 ABAQUS 中的动态仿真技术,依据流固耦合理论,对注浆堵水层厚度进行优化研究,为注浆堵水提供合理的施工参数。

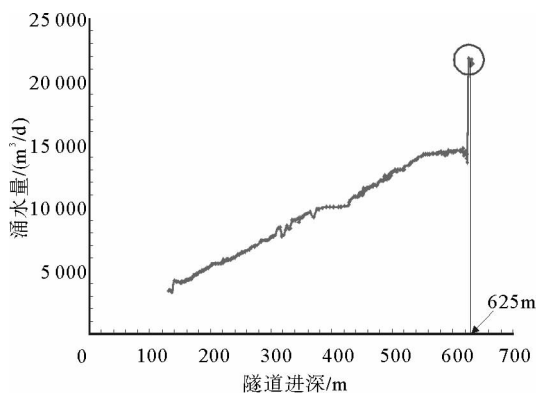


图 1 隧道掘进过程围岩涌水量统计

Fig. 1 The statistics of water inflow of surrounding rock during the tunnel excavation



(a) 地面积水情况



(b) 断面突水、涌水勘察

图 2 隧道掘进至 625 m 时现场突水、涌水问题

Fig. 2 The problem of water inrush when tunneling to 625 m

## 1 流固耦合计算原理

利用 ABAQUS 计算岩土体的流固耦合效应时,将岩体视为等效连续介质,且不考虑土体的压缩性,同时不考虑气体的影响,即把研究对象看作是两相物质。在进行流固耦合分析时,需同时考虑应力场和渗流场的平衡,因此考虑流固耦合效应的控制方程组由应力场平衡方程和渗流场微分方程共同组成,由于该方程组具有很强的非线性,通常采用牛顿迭代法进行求解。

### 1.1 应力场平衡方程

在有限元计算中,采用多项式插值在空间上将虚功原理进行转化,得到的应力场可按式(1)进行平衡<sup>[10-11]</sup>:

$$\delta v^N \int_V \beta^N : \sigma dV = \delta v^N \left( \int_S N^N f_s dS + \int_V N^N f dV + \int_V s n \rho_w N^N g dV \right). \quad (1)$$

其中: $\delta v^N$  表示单元各节点虚位移; $\beta^N$  表示单元节点虚位移与单元虚应变的关系, $\beta^N = \text{sym} \left( \frac{\partial \delta N^N}{\partial x} \right)$ ,其中  $N^N$  为单元节点坐标的函数; $\sigma$  为 Cauchy 应力; $f_s$  表示单位面积上的面力; $f$  表示除流体之外的体力; $s, n$  分别为土体饱和度及孔隙率; $\rho_w$  为液体的密度; $g$  表示重力加速度。

### 1.2 渗流场微分方程

在进行渗流场平衡计算中,假定流体在固体土颗粒中保持一种连续状态流动,根据质量守恒定律,得到

多孔介质中流体的连续方程<sup>[10-11]</sup>为:

$$\int_V \frac{1}{J} \cdot \frac{d}{dt} (J \rho_w n_w) dV + \int_S \rho_w n_w \cdot v_w dS = 0. \tag{2}$$

其中: $J = \left| \frac{dV}{dV^0} \right|$  表示土体体积的变化; $n_w = sn$ ;  $\cap$  是面  $S$  的外法线方向; $v_w$  为水流相对于固体颗粒的平均流速。

假设渗透系数  $k$  与土在饱和状态时的渗透系数  $K$  存在如下关系:

$$k = k_s K. \tag{3}$$

其中, $k_s$  是与饱和度有关的系数,当饱和度为 1 时, $k_s = 1$ 。渗流场的微分方程可转化为:

$$\int_V \delta u_w \frac{1}{J} \frac{d}{dt} (J \rho_w n_w) dV + \int_V \delta u_w \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho_w \left( -k \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \right] dV = 0. \tag{4}$$

其中: $\delta u_w$  表示孔隙水压力的变分; $\varphi$  表示渗流水头;计算公式为  $\varphi = z + \frac{u_w}{g \rho_w}$ ,  $z$  表示海拔高度。

### 1.3 渗透系数的定义

流固耦合分析中须包括对土体渗透系数的定义。液体的渗透采用 Forchheimer 渗透定律<sup>[12]</sup>,其渗透系数  $\bar{k}$  的定义为:

$$\bar{k} = \frac{v}{g} \frac{k_s}{(1 + \beta \sqrt{v_w v_w})} K. \tag{5}$$

其中: $v$  是液体的运动粘度; $g$  为重力加速度; $k_s$  是与饱和度有关的系数,当饱和度为 1 时, $k_s = 1$ ; $\beta$  是渗透系数受反映速度影响的系数,当  $\beta = 0$  时,Forchheimer 渗透定律即可简化为 Darcy 定率; $v_w$  为流速; $K$  为土在饱和状态时的渗透系数。

在流固耦合分析中,土体的渗透系数随着应力场的变化而变化,因此,该系数属于耦合参数。

## 2 隆拉隧道注浆堵水层厚度优化研究

### 2.1 隧道参数化几何模型

注浆堵水层厚度对隧道工程堵水效果产生重要影响。为提高分析效率,通过 Python 语言编程实现基于 ABAQUS 的参数化建模及计算<sup>[13]</sup>。利用该方法能够完成自动调整注浆堵水层厚度并建立模型、划分网格、设定边界条件及分析步,并自动计算、形成不同方案对应的计算结果文件的输出。

为减小模型的边界效应,较好地模拟渗流效应,模型尺寸 150 m×150 m。模型左右两边界施加 X 方向的水平约束;模型底部边界施加 Y 方向竖向约束;对整个模型施加岩体自重重力;根据现场勘察资料及模型尺寸,顶部施加 1 MPa 水压,底部为 2.5 MPa 水压,两侧根据梯度从 1 MPa 至 2.5 MPa 递增;隧道开挖施作衬砌后,定义衬砌内表面为自由排水面。隧道设计净宽为 10.10 m,净高为 8.00 m,衬砌厚度为 20 cm,注浆堵水圈厚度则是可以变化的参数。图 3 为不同注浆堵水层厚度的参数化有限元模型示意图。

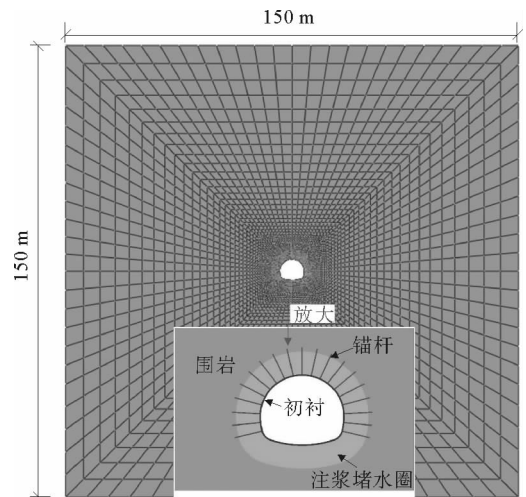


图 3 不同注浆堵水层厚度的参数化有限元模型

Fig. 3 The parameterized finite element model of the different thickness of grouting layer for blocking water

模型选取隧道进深 625 m 处,现场勘察表明,该断面围岩条件较差,以微风化黑云母花岗岩为主,一般为 V 级围岩,根据现场工程勘察资料和公路隧道设计规范<sup>[14]</sup>确定围岩力学参数取值范围见表 1。

数值模拟隧道开挖支护过程与现场施工一致,注浆堵水圈作用效果的模拟通过改变该区域材料属性来实现。对围岩的注浆实践<sup>[15-17]</sup>表明,注浆结束后围岩的透水系数一般能变为原来围岩透水系数的 0.1%~0.5%,围岩的弹性模量提高 30%以上,粘聚力和内摩擦角都能提高 20%~30%以上。根据现场具体情况分析,确定数值计算注浆区岩体参数如表 2 所示。

表 1 隧道围岩及结构材料基本力学参数

Tab. 1 Mechanics parameters of surrounding rock and supporting structure of tunnel

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m/s)
弱风化黑云母石英片岩	2 000	3.0	0.30	0.7	35	1.6×10 <sup>-4</sup>
初次衬砌	2 500	25.5	0.18	14.0	58	1.0×10 <sup>-8</sup>
锚杆	7 800	105.0	0.20	—	—	—

表 2 注浆区材料的基本力学参数

Tab. 2 Mechanics parameters of the material of grouting region

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m/s)
注浆区岩体	2 500	4.5	0.30	1.0	46	1.6×10 <sup>-7</sup>

## 2.2 计算结果分析

隧道开挖过程中,围岩屈服破坏过程采用 Druck-Prager 强度准则模拟<sup>[18]</sup>。根据流固耦合理论,以不设置注浆堵水层和 10 种不同注浆加固圈厚度分别为 0.5,1,1.5,2,2.5,3,3.5,4,4.5,5 m 作为系列,模拟不同注浆加固圈厚度对堵水效果的影响,确定合理的注浆加固圈厚度,为现场施工提供合理依据。

### 2.2.1 不堵水情况计算结果分析

分析不注浆堵水情况下衬砌水压分布的数值模拟计算结果可以看出,施工结束后衬砌承受着较大的水压力。由于衬砌内侧设为自由排水边界,因此从衬砌内侧向外侧水荷载从 0 增长到 0.39 MPa。衬砌内水流流速分布计算结果表明,衬砌内各个部位水流流速并不一致,拱脚及拱腰位移流速较大,而拱顶和拱底则相对较小。水流流速最大位置位于拱脚内侧位置,达到 0.003 11 m/s。统计整个断面的流量达 21 093 m<sup>3</sup>/d。这与现场实测结果数值较接近。

### 2.2.2 注浆堵水层厚度研究

提取不同注浆堵水层厚度情况下衬砌承受最大水压力,得到变化规律如图 4 所示,并与未注浆情况作对比,可以看到采用注浆堵水后,衬砌外表面承受的水压力明显减小。对比不同注浆层厚度产生的效果发现,注浆层越厚堵水效果越好,当  $D=0.5$  m 时,衬砌外表面的水压为 0.012 MPa,当  $D=5$  m 时,减小到 0.002 4 MPa。

提取不同注浆堵水层厚度情况下衬砌内最大水流速度,得到变化规律如图 5 所示,并与未注浆情况作对比,可以看到衬砌内水流流速较未注浆时降低了两个数量级,而且注浆层厚度越大,衬砌内水的渗流流速越慢,即排水量越小。当  $D=0.5$  m 时,断面流量为 557 m<sup>3</sup>/d,当  $D=5$  m 时,断面的流量为 104 m<sup>3</sup>/d。

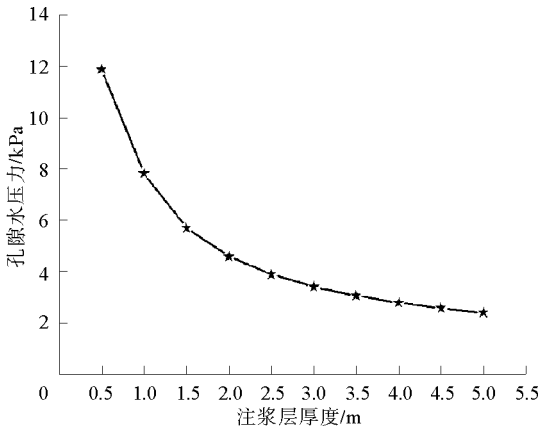


图 4 衬砌承受最大水压力随注浆层厚度的变化规律

Fig. 4 The change law of the maximum water pressure in lining under the condition of different thickness of grouting layer for blocking water

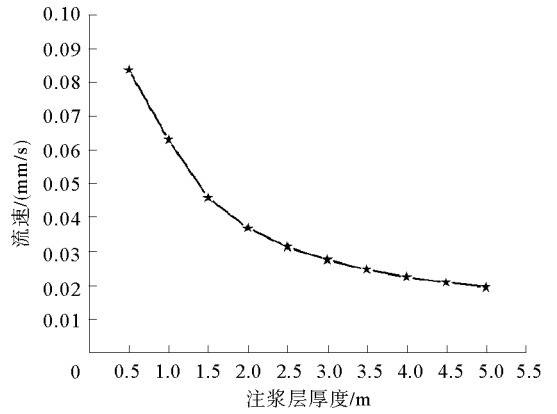


图 5 衬砌最大流速随注浆层厚度的变化规律

Fig. 5 The change law of the maximum equivalent velocity of water flow in lining under the condition of different thickness of grouting layer for blocking water

图 6 为不同注浆层厚度隧道衬砌排水量, 当  $D \geq 3$  m 时, 隧道断面排水量低于  $150 \text{ m}^3/\text{d}$ , 并基本稳定。

从堵水效果来看, 注浆层越厚, 地下水对衬砌产生的压力越小, 同时隧道断面的排水量也越小。但是, 从经济及现场情况分析, 可将注浆层厚度设计为 3 m 左右。

### 2.3 工程应用

针对嘎隆拉隧道进深 625 m 断面出现的突水涌水问题, 设计注浆堵水层厚度为 3 m 进行施工, 注浆锚杆的安装及施工后的分布情况如图 7 所示。通过图 7 可以看出, 施工结束后, 岩壁内突水涌水得到较好的控制, 从而确保工程的顺利进行。

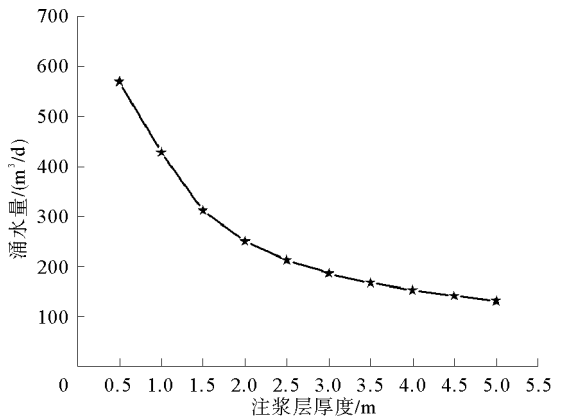


图 6 隧道涌水量随注浆层厚度的变化规律

Fig. 6 The change law of water inflow of the tunnel section under the condition of different thickness of grouting layer for blocking water



(a) 注浆锚杆的安装



(b) 注浆锚杆分布情况

图 7 注浆堵水层现场施工图

Fig. 7 The construction drawing of the grouting layer for blocking water

### 3 结论

结合嘎隆拉隧道部分施工段出现的围岩大面积突水、涌水问题,基于流固耦合理论,研究不同注浆层厚度对堵水效果的影响规律,主要结论如下:

1) 基于 ABAQUS 中的动态仿真技术,应用 Python 语言编程建立能够模拟不同注浆堵水层厚度的参数化模型,极大提高了分析该类问题的效率。

2) 从堵水效果来看,注浆层越厚,地下水对衬砌产生的压力越小,衬砌内水流流速越慢,同时隧道断面的排水量越小。注浆堵水层厚度为 5 m 时,衬砌外表面的水压减小到 0.002 4 MPa,断面的流量为 104 m<sup>3</sup>/d;当厚度 ≥ 3 m 时,隧道断面排水量低于 150 m<sup>3</sup>/d,并基本稳定。通过数值仿真结果和经济及现场情况分析,可将注浆层厚度设计为 3 m 左右。同时,将计算结果应用于工程实际中,达到了较好堵水效果。研究结果及方法对于突水涌水隧道控制地下水排放、减轻对地下水资源破坏具有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 崔玖江. 水下隧道注浆堵水[M]. 北京:人民铁道出版社,1978:1-56.
- [2] 宋战平. 隐伏溶洞对隧道围岩-支护结构稳定性的影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2006:10-49.
- [3] 张学文. 金子山隧道穿越 F2 富水断层带的帷幕注浆综合施工技术探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2008,6(4):63-66.  
Zhang Xuwen. Research on comprehensive construction technique of curtain grouting for F2 of Jinzishan tunnel[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2008,6(4):63-66.
- [4] 余波. 深埋隧洞中的岩溶地基工程地质问题及地基处理[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(3):403-407.  
Yu Bo. Engineering geology problem of karst foundation with tunnel and treatment of the foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2001,20(3):403-407.
- [5] 张成平,张顶立,王梦恕,等. 高压富水区隧道限排衬砌注浆圈合理参数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(11):2270-2276.  
Zhang Chengping,Zhang Dingli,Wang Mengshu,et al. Study on appropriate parameters of grouting circle for tunnels with limiting discharge lining in high water pressure and water-enriched region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,23(11):2270-2276.
- [6] 何红忠,王星华. 海底隧道修建中注浆加固圈参数研究[J]. 公路交通技术,2008(5):99-102.  
He Hongzhong,Wang Xinghua. Study on parameters of grouting reinforced rim during undersea tunnel[J]. Technology of Highway and Transport,2008(5):99-102.
- [7] 李鹏飞,张顶立,赵勇,等. 海底隧道复合衬砌水压力分布规律及合理注浆加固圈参数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(2):280-288.  
Li Pengfei,Zhang Dingli,Zhao Yong,et al. Study of distribution law of water pressure acting on composite Lining and reasonable parameters of grouting circle for subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(2):280-288.
- [8] 陈俊儒. 基于流固耦合的海底隧道注浆圈合理参数研究[D]. 长沙:中南大学,2009:9-58.
- [9] 汪优,王星华,刘建华,等. 基于流固耦合的海底隧道注浆圈渗流场影响分析[J]. 铁道学报,2012,34(11):280-288.  
Wang You,Wang Xinghua,Liu Jianhua,et al. Analysis on seepage field of grouting circle in subsea tunnel based on fluid-solid coupling[J]. Journal of the China Railway Society,2012,34(11):280-288.
- [10] 张欣. 基于 ABAQUS 流固耦合理论的库岸滑坡稳定性分析[D]. 济南:山东大学,2005:5-55.
- [11] Hibbitt D,Karlsson B,Sorensen P. ABAQUS theory manual and analysis user's manual[R]. Pawtucket, USA: ABAQUS Inc.,2002.
- [12] 王义山. 基于流固耦合的水库岩质边坡稳定性分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2011:1-36.
- [13] 王辉,陈卫忠,陈培帅,等. 浅埋大跨小净距隧道断面形态及合理间距的优化研究[J]. 岩土力学,2011,32(增2):641-646.  
Wang Hui,Chen Weizhong,Chen Peishuai,et al. Study of section morphology and reasonable distance optimization of large-span twin tunnels with small clear spacing in shallow rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(S2):641-646.
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [15] 张民庆,黄鸿健,殷怀连,等. 齐岳山隧道富水溶槽注浆堵水技术[J]. 现代隧道技术,2006,43(3):47-51.



Zhang Mingqing, Huang Hongjian, Yin Huailian, et al. Grouting to stop the water ingress from a water contained karst depression in Qiyueshan tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(3):47-51.

[16] 王明胜, 王全胜. 海底隧道超前预注浆注浆压力选择研究[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(2):15-18.

Wang Mingsheng, Wang Quansheng. Discussion on reasonable pre-grouting pressures for Qingdao Jiaozhou bay subsea tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47(2):15-18.

[17] 李建设, 汪纲领. 客运专线隧道初期支护后注浆堵水技术[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(4):71-75.

Li Jianshe, Wang Gangling. Grouting techniques for water stopping in PDL tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(4):71-75.

[18] 刘彦波. 岩溶富水地层隧道施工处治技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2008:1-52.

(责任编辑:吕海亮)

## (上接 82 页)

[5] 李颖, 贡鑫鑫. 有斜桩和无斜桩高桩码头地震反应的非线性有限元分析[J]. 水利水运工程学报, 2011(2):1-14.

Li Ying, Gong Jinxin. Nonlinear finite element analysis for seismic performance of wharf structures with and without batter piles attached[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(2):1-14.

[6] 王丽, 郑刚. 局部倾斜桩竖向承载力的有限元研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11):3533-3538.

Wang Li, Zheng Gang. Research on vertical bearing capacity of partially inclined pile with finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11):3533-3538.

[7] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC<sup>3D</sup>基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009:313-333.

[8] 郑刚, 王丽. 竖向荷载作用下倾斜桩的荷载传递性状及承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3):323-330.

Zheng Gang, Wang Li. Load transfer and bearing capacity of inclined pile under vertical load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3):323-330.

[9] 凌贤长, 郭明珠, 王东升, 等. 液化场地桩基桥梁震害响应大型振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1):7-10.

Ling Xianzhang, Guo Mingzhu, Wang Dongsheng, et al. Large-scale shaking table model test of seismic response of bridge of pile foundation in ground of liquefaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1):7-10.

[10] 孔德森, 李纯洁, 凌贤长, 等. 液化场地群桩-土-结构地震相互作用振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2):143-149.

Kong Desen, Li Chunjie, Ling Xianzhang, et al. Shaking table tests on pile group-soil-structure interaction to seismic loading on liquefied ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2):143-149.

[11] 凌贤长, 唐亮, 徐鹏举, 等. 液化场地桩基加速度反应试验与数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(10):1546-1551.

Ling Xianzhang, Tang Liang, Xu Pengju, et al. Numerical simulation and shaking table test for acceleration response of piles in liquefiable ground[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(10):1546-1551.

(责任编辑:吕海亮)