

文章编号: 1000-7598 (2012) 04-1185-06

深层高压注浆加固古滑坡滑动带试验及效果分析

秦前波¹, 方引晴¹, 骆行文², 黄年辉³

(1. 广州市设计院, 广州 510620; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;
3. 广西安科岩土工程有限责任公司, 南宁 530023)

摘 要: 通过深层高压注浆法加固混碎石黏土古滑坡滑动带的成功工程实例, 结合各种检测手段及有限元弹塑性分析, 阐述对混碎石黏土古滑坡滑动带实施深层高压注浆加固的机制; 测试和分析了滑动带压力注浆前后物理力学参数的变化特征; 计算了注浆前后滑坡的剩余下滑力及安全系数。电镜观测表明, 水泥浆液对于滑动带岩土体的充填置换率可达到 5%~10%; 土工试验结果显示, 滑动带土体黏聚力由 20.20 kPa 提高到 39.54 kPa, 内摩擦角由 16° 升高到 21.30°; 声波 CT 扫描试验表明, 滑动带土体的声波波速增长约为 31%。有限元弹塑性分析计算表明, 滑坡由注浆前的不稳定状态变为注浆后的基本稳定状态, 边坡剩余下滑力大幅减小, 为支撑结构设计提供了优化依据。试验及计算分析结果表明, 高压注浆法用于加固滑动带岩土体是可行的, 经注浆加固后的滑动带岩土体的力学性能得到了明显改善, 边坡安全性得到了提高。

关 键 词: 边坡加固; 高压注浆; 强度参数; 滑动带

中图分类号: TU 442

文献标识码: A

Test and analysis of effect of applying deep high pressure grouting method to stabilizing sliding zone of ancient debris landslide

QIN Qian-bo¹, FANG Yin-qing¹, LUO Xing-wen², HUANG Nian-hui³

(1. Guangzhou Design Institute, Guangzhou 510620, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
3. Guangxi Anke Limited Liability Company of Geotechnical Engineering, Nanning 530023, China)

Abstract: Based on successful reinforcement projects of the sliding zone of the ancient debris landslide with applying deep high pressure grouting method, and combined with various detection measures and elastoplastic finite element analysis, the mechanism of deep high pressure grouting to reinforce sliding zone, physico-mechanical parameters of the soil in sliding zone before and after grouting, the remnant sliding force and safety factors of the landslide have been studied. Electron microscopy experiments show that, The filling replacement rate of cement slurry to rock and soil in sliding zone is 5%~10%. The soil tests results indicate that the soil cohesion increase from 20.20 kPa to 39.54 kPa and its internal friction angle from 16° to 21.30°. The sound wave CT scanning experiments show that the sound wave velocity of the soil in the sliding zone increases about 31%. The finite element analysis show that pressure grouting could make the unstable landslide go into the basic stable state and the remnant sliding force reduces a lot. These can provide optimization basis for retaining structure design. Tests and calculation results show that high pressure grouting method for enhancing the rock and soil in sliding zone is feasibility. The mechanical performance of the rock and soil in sliding zone has been significantly improved and the safety of the slope has been enhanced.

Key words: slope reinforcement; high pressure grouting; strength parameter; sliding zone

1 引 言

以注浆改良土体性质、提高其强度的施工工艺在矿山、水利、软土地基处理和治理湿陷性黄土等方面得到了广泛应用。工程实践也曾利用注浆于滑动带, 以提高其强度、稳定滑坡, 但由于滑动带中含水率较高, 多成软塑状黏性土, 浆液可灌性很差,

加固的滑动带进浆量较少, 效果不佳, 另外因效果检验困难和耐久性不易控制而未能得到推广。

传统的注浆工艺是以“渗入性理论”为基础的, 注浆时只采用相对较低的注浆压力, 使浆液在孔隙或裂隙中扩散时不致破坏岩土体的原有结构。近年来人们逐渐认识到, 利用高压注浆劈裂挤密原理, 可人为地制造或扩大岩土的裂隙或孔隙, 使低透水岩

收稿日期: 2011-07-26

第一作者简介: 秦前波, 男, 1979 年生, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程设计方面的研究工作。E-mail: qqbren2325@126.com

土层的可灌性和注浆量提高，从而获得更为满意的灌浆效果^[1-2]。

高压注浆法是指浆液在孔内随着注浆压力的增加，先压密周围土体，当压力大到一定程度时，浆液流动使地层产生劈裂，形成脉状或条带状胶结体。采用高压注浆法加固边坡，可以减少边坡的开挖量和对环境的破坏、保留原始坡表，从而易于进行生态建设和恢复，起到保护环境的作用。

笔者结合成功的工程实例，采用各种检测手段，研究了古滑坡滑动带高压注浆的加固机制和注浆的滑动带岩土体强度参数的增长规律和滑坡安全性变化特点。为推广高压注浆技术加固滑带土提供试验依据和理论支持。

2 工程概况

桂林至梧州高速公路钟山至马江段 K196+580~K196+700 段百花滩 2[#] 隧道出口滑坡体为座椅状古滑坡体，向斜地貌，滑坡舌为 I 级阶地全新统冲积 Q₄^{al} 覆盖。图 1 为滑坡体平面示意图，因工程开挖形成临空面使古滑坡体的地应力重新分布及暴雨使滑坡体的含水率增大，地表水下渗影响滑面的稳定直接诱发滑坡的形成。

滑坡纵向最大长度为 212.3 m，横向最大宽度为 111.4 m，滑坡体最大厚度为 24.5 m，体积约 60×10⁴ m³，为中型深层滑坡。组成滑体的堆积层以强透水的碎石土为主，滑动面滑床主要为下泥盆系 D11 紫红色泥质砂岩、泥质粉砂岩，滑床面基本上受断裂与岩层产状控制。由于该滑坡体在天然状态

下处于不稳定状态，考虑到常用的清方减载等措施，容易破坏原始的地形地貌，造成水土流失，对环境保护极为不利等因素，设计单位采取以抗滑桩为主，结合滑带高压注浆为辅的治理手段。

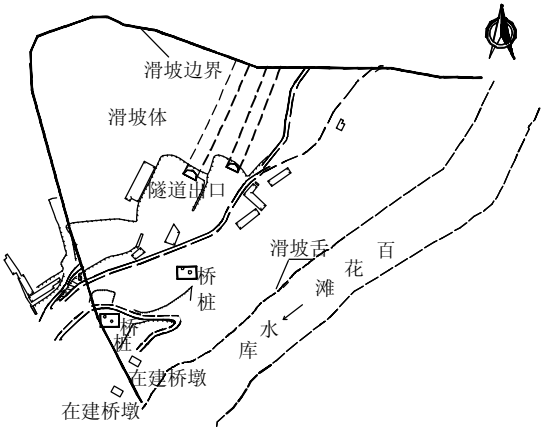


图 1 滑坡体平面示意图
Fig.1 Layout plan of landslide

3 滑动带的特性

考虑井探及钻孔抽芯等检测手段的安全性和工期的因素，选择滑坡体前缘滑体厚度较薄处作为检验段，该滑坡体滑带的埋深为 7.0~11.5 m 之间（滑带的倾角约为 25°），滑带厚度为 0.2~5.0 m，位于强风化面上，由糜棱状混砾石的黏土软弱夹层组成，黏粒含量大（60%以上），该土层结构较致密，透水性较弱，含水率较高。该滑动带加固前岩土体物理力学参数统计见表 1（统计个数为 17）。

表 1 注浆前滑带土物理力学参数统计表
Table 1 Statistics of physico-mechanical parameters of the soil in sliding zone before grouting

含水率 /%	密度 /(g/cm ³)	干密度 /(g/cm ³)	孔隙比	饱和度 /%	液限	塑限	塑性 指数	液性 指数	抗剪强度(天然快剪)		残余强度	
									黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
27.06	2.06	1.61	0.78	94.2	31.6	20.9	10.8	0.7	20.20	16	10	12

注：各数值均为平均值。

4 滑动带压力注浆设计

4.1 滑动带岩土体压力注浆机制^[3]

(1) 化学胶结作用

通过浆体在软弱夹层中的有效扩散及化学反应后，凝固的浆体在软弱岩土层中形成骨架，通过一定的化学反应改变软弱夹层的物理成分和结构特性，可有效减小软弱夹层遇水软化，且可使软弱岩土体的结构更加致密，使岩土体整体结构和抗剪强度指标得到加强。

(2) 劈裂挤密作用

压力作用下浆体可在软弱夹层中劈裂，形成原充填物与浆体的互层，使软弱岩土层经过挤密、脱水和压实，整体性质得到改善。

(3) 填充置换作用

因软弱岩土层及其邻近岩体裂隙较发育，常为地下水的赋存及流动通道，在压力作用下水泥浆液会顺着裂隙通道流动，一方面对裂隙内原有的软弱胶结体进行压力冲洗，与此同时也对裂隙进行充填，形成强度更高的胶结体；另一方面也有效地封堵原有裂隙导水通道，这将有效根除由于水的存在对滑动带岩土体的软化作用而造成的工程隐患。

(4) 离子交换作用

灌浆液在化学反应过程中, 某些化学成分能与岩土中的元素进行离子交换, 从而形成具有更加理想性质的新材料。

4.2 劈裂挤密力学机制分析

对于滑坡滑动带岩土体的灌浆, 浆液是通过颗粒间孔隙的渗透和挤压劈裂灌注。在灌浆压力较小的情况下, 浆液在孔隙中渗流的范围小, 同时灌浆压力对地层的挤压作用也小。当灌浆压力增大到在钻孔孔壁上引起的切线拉应力大于地层的小主应力与土壤的抗拉强度之和时, 地层发生劈裂。对于结构较致密的糜棱状混砾石软弱黏土夹层组成来说, 由于土颗粒间的孔隙很少, 在劈裂产生前, 其可灌性很小, 只有压力达到能使土体劈裂缝产生时, 浆液方可灌注。

取滑坡体前缘横向中间滑动带上任一点进行研究, 劈裂灌浆初次出现的劈裂面往往是阻力最小的主应力面, 如图2所示。这3个应力的可用式(1)表示。

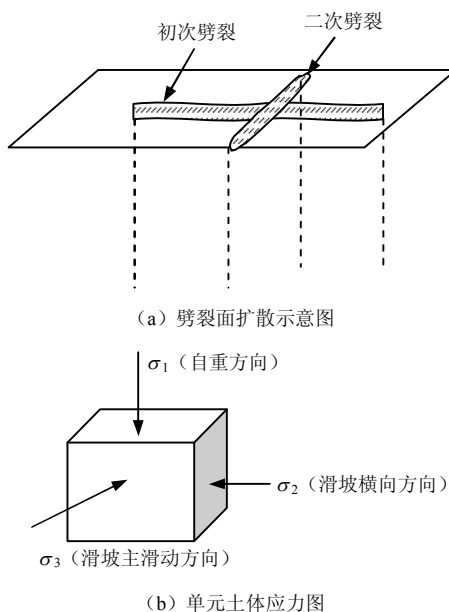


图2 土体中的应力及劈裂面扩散示意图
Fig.2 Sketches of stress of soil and the diffusion of the split surface

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= K_1 \gamma h \\ \sigma_2 &= K_2 \gamma h \\ \sigma_3 &= K_3 \gamma h\end{aligned}\quad (1)$$

式中: γ 为湿土重度 (kN/m^3); h 为计算深度 (m); K_1 为滑坡体内垂直压力系数; K_2 为滑坡体内纵向侧压力系数; K_3 为滑坡体内横向侧压力系数。

由于滑坡体纵向最大长度为 212.3 m, 横向最

大宽度约 110 m, 在滑坡体内可视滑坡体为无限体, 垂直压应力 σ_1 , 等于土体自重压力, 一般取 $K_1=1$; 在 σ_2 方向为滑坡体的横断面, 为有限断面, 滑坡体不是无限体, 但滑坡体两侧存在一定的约束边界, 所以 K_2 一般比较大; 在 σ_3 方向为滑坡体的纵断面, 也为有限断面, 与滑坡主滑方向一致, 若视滑坡体前缘不存在被动阻滑段, 则滑坡体在主滑方向可认为不存在约束边界, 是可以位移的, 在滑坡体中, 尤其在滑坡体前缘附近 σ_3 比地基中的侧压力小得多, 因此一般情况下 $K_1 > K_2 > K_3$ 。

滑坡体中 3 个主应力的方向是互相正交的, 而且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, 所以在滑坡体进行钻孔灌浆时, 灌浆压力首先容易劈开的是小主应力面, 即 σ_3 的作用面, 也就是沿滑坡体横向的纵向缝, 而且裂缝比较规则。劈裂压力与地基中的小主应力及抗拉强度成正比: 浆液愈稀, 注入愈慢, 则劈裂压力愈小; 当液压超过劈裂压力时, 劈裂面突然产生, 并且迅速扩展, 浆液进入裂隙, 灌浆压力下降。在土体劈裂后继续灌注大量浆液, 则灌浆压力会缓慢升高, 小主应力 σ_3 有所增加。一旦注浆压力提高到大于土中的中间主应力 σ_2 , 就会在中间主应力面产生新的劈裂面, 即二次劈裂的横缝。

当注浆孔孔距适当时, 压力注浆固结体沿软弱滑动带形成连续完整的加固带。

4.3 压力注浆设计

图3为I序注浆孔分布及最不利地质剖面图, 注浆孔按 $3.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ 梅花型等间距平均分布在边坡面上, 钻孔孔径为 110 mm。采用花管护壁注浆法施工, 花管外径为 48 mm, 壁厚为 3.5 mm, 长度为 6 m, 由普通钢管加工制成, 钢管前端加工成锥形, 管壁四周钻 16 mm 漏浆孔, 梅花管全部伸入滑动带以下稳定滑床不少于 3.0 m, 垂直于海平面布置。

针对滑坡体以堆积强透水的碎石土为主, 浆液扩散易出现溢出、跑浆等现象, 且由于范围较大, 难于采取有效措施加以封堵, 施加高压力的难度较大, 应适当添加速凝剂确保灌浆压力, 并采取专利施工工艺来完成这一任务^[4-6]。

注浆采用单孔分层、分段、分序、多次灌浆加固技术, 自上而下分 2~3 段灌注且在孔口预埋止浆塞。灌浆孔先钻 6 m 左右, 在 0~6 m 滑坡体松散碎石土中灌浆, 形成表层密闭硬壳体, 注浆压力为 1.2 MPa, 然后再钻至 15 m 左右, 在 6.0~11.5 m 滑动带压力处灌浆, 注浆压力为 4.0 MPa。浆液采用 C42.5 普通硅酸盐水泥, 水灰比为 0.8~1.0。

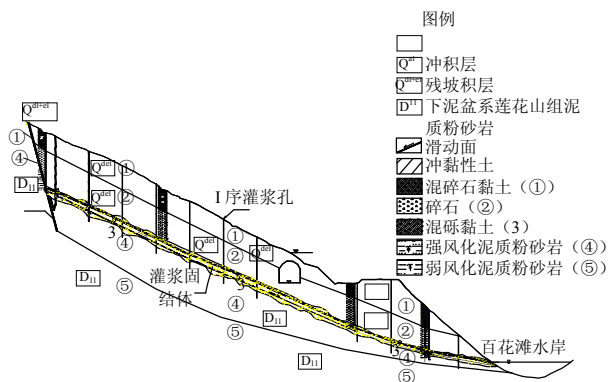


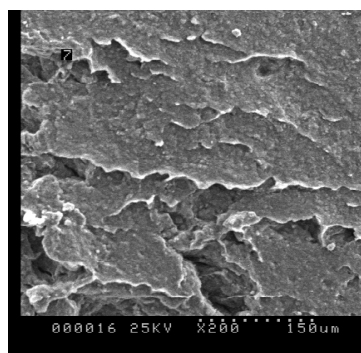
图3 边坡I序注浆孔分布及最不利地质剖面图
Fig.3 Distribution of grouting holes of number I and the serious disadvantageous geological profile of landslide

5 加固效果分析

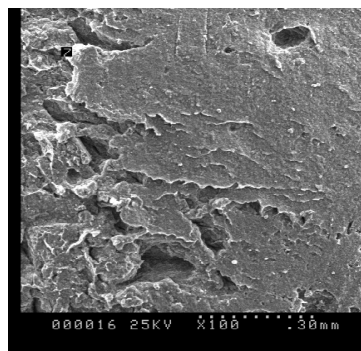
在滑动带位置进行注浆加固后,通过电镜扫描、钻孔抽芯(及井探)、物探、土工试验等方法对试验前后滑坡土体的声波波速及物理力学指标进行对比,以检验高压注浆技术加固界滑动带的有效性。

5.1 电镜分析

针对竖井中的4个环刀样品进行电镜分析试验,以验证水泥在滑动带土中的渗透程度。滑动带土体注浆后电镜分析照片如图4所示。



(a) 电镜照片一



(b) 电镜照片二

图4 滑动带土体注浆后电镜照片
Fig.4 Electron micrographs of the soil in sliding zone after grouting

从电镜扫描图片可见,水泥浆沿劈裂张节理进入,平面上呈不平滑条带状,长短不一(50~350 μm)。说明水泥浆已渗入到土体内。根据试验结果,滑带土层中水泥充填置换率(灌浆后土体密度增长率)一般为5%~10%,极大地改善了滑带土层的物理力学参数,增强了边坡的稳定性。

5.2 土工试验数据对比

灌浆后第7d,开始钻孔抽芯(或井探)取样,从岩芯上看,岩土体与浆液结合紧密,结石体强度较高,如图5、6所示。



图5 注浆后滑动段土体钻孔抽芯
Fig.5 Drilling drawing-core in sliding zone after grouting



图6 竖井滑动带段井壁展示图
Fig.6 Display figure of shaft wall in sliding zone

取5组水泥与滑带土胶结面以下被挤密的滑动带岩土样进行试验,其成果如表2所示。

从表1、2可以看出,该处土体的密度由2.06 g/cm^3 提高到2.22 g/cm^3 ;含水率却由27.06%降到17.52%;土体的天然快剪强度中黏聚力由20.20 kPa提高到39.54 kPa;内摩擦角由10°升高到21.30°。从以上岩土体的物理性质的增强,可知,注浆加固效果显著,滑动带岩土体注浆后整体性和稳定性得到提高。

5.3 CT对比检测

CT检测具体数据见表3。

表 2 注浆后滑带土物理力学参数统计表

Table 2 Physico-mechanical statistic parameters of the soil in sliding zone after grouting

含水度 /%	密度/(g/cm ³)		孔隙比	饱和度 /%	天然快剪		残余强度	
	湿	干			黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ /(°)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ /(°)
17.52	2.22	1.89	0.50	97.9	39.54	19.44	21.32	13.16

注：表中数据均为平均值。

表 3 注浆加固前后声波 CT 检测结果

Table 3 Acoustic wave test results before and after reinforced by grouting

深度 /m	注浆前的波速/(m/s)		注浆后的波速/(m/s)		波速提高率 /%
	波速范围	平均波速	波速范围	平均波速	
6.0~7.5	1 407~1 514	1 457	1 458~1 586	1 521	4
7.5~9.5	1 417~1 800	1 549	1 968~2 027	2 031	31
9.5~11.0	1 800~1 867	1 845	1 802~1 921	1 872	1

由表 3 可以看出，在 7.5~9.5 m 深度滑动带段纵波速度值提高幅度较大，说明该深度段进浆较多；其余深度段的纵波速度值变化不明显，进浆则较少。

以上各项检测数据对比表明，经过注浆后，滑动带岩土体物理力学性质有明显改善，各种物理力学指标都有较大提高^[7-8]。滑动带岩土体变得更致密，抗滑、抗压及抗剪能力均得到提高，注浆效果明显。

5.4 滑坡剩余下滑力及安全系数计算

选取以上最不利地质剖面，采用 Midas GTS 程序对加固前后的边坡进行弹塑性有限元分析，边坡稳定的安全系数采用强度折减法进行计算^[9-10]。

图 7 为有限元计算模型网格图，其中边坡的尺寸、土体分层厚度，层面的倾角等与实际工程一致，分为加固前和加固后两种工况进行计算。

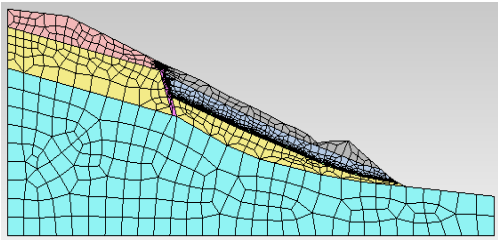


图 7 有限元模型网格

Fig.7 Meshes of the finite element model

工况 1 是分析滑坡加固前的情况。图 8 为有限元分析得到的剪应变云图，由图可知，边坡剪应变塑性区已经贯通形成滑动带，边坡发生失稳破坏，安全系数为 0.95。

工况 2 分析滑坡加固后的情况。图 9 为有限元分析得到的剪应变云图，边坡安全系数为 1.10。根

据《滑坡防治工程勘查规范》，边坡由加固前的不稳定状态调整到基本稳定状态。但在浅层坡残积层与主滑体混碎石黏性土截面出现另一道剪应变塑性区带，说明浅层存在潜在滑动趋势，应采取适当削坡减载保证安全。

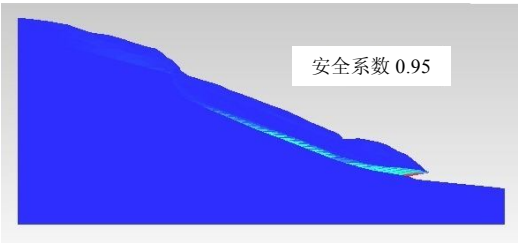


图 8 注浆前最危险滑弧的位置

Fig.8 Position of the most dangerous sliding surface before grouting

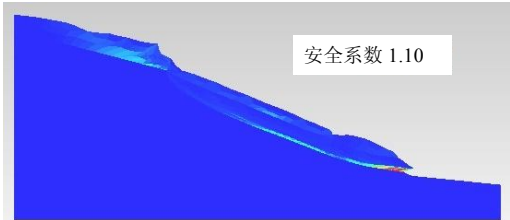


图 9 注浆后最危险滑弧的位置

Fig.9 Position of the most dangerous sliding surface after grouting

由图 8、9 分析可知，滑坡滑动带高压注浆前后，滑动带岩土体的强度参数有较大增长，安全系数得到提高。

高压注浆前后的滑坡剩余下滑力采用传递系数法计算得出。安全系数及剩余下滑力计算结果见表 4。

表 4 注浆前后滑坡剩余下滑力及安全系数表

Table 4 Safety factors and remnant sliding force of landslide before and after grouting

暴雨状态	剩余下滑力/(kN/m)	安全系数
加固前	8 475	0.95
加固后	4 514	1.10

由表 4 可知，高压注浆加固后滑坡由不稳定状

态变为基本稳定状态, 剩余下滑力大幅度减小, 给支挡结构的优化提供前提。

6 结 论

(1) 各种检测及分析计算结果表明, 高压注浆通过化学作用、置换、充填及挤密作用可有效加强滑动带岩土体的力学性质, 说明采用特殊的高压注浆施工工艺是成功的。

(2) 井探检测表明, 高压注浆加固形成的加固带的产状与滑坡滑动带产状基本一致, 说明高压注浆对于加固滑坡软弱滑动带的有效性和可行性。

(3) 土工试验和声波测试表明, 经压力注浆加固后滑动带岩土体力学性能得到明显的改善, 抗剪强度指标增幅明显。

(4) 由于灌入的浆液在凝固前为塑性体, 会暂时降低滑面的抗剪强度, 在设计施工方案时需充分考虑这一特点, 宜隔段施工, 以免边坡失稳。

(5) 经过高压注浆处理滑动带后的滑坡剩余下滑力大大减小, 安全系数得到较大提高, 可较大程度优化其他支挡结构(如抗滑桩等)。

参 考 文 献

- [1] 程良奎, 张作眉, 杨志银. 岩土加固实用技术[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [2] 王刚, 陈金海, 王明星. 用加密注浆法加固高速公路高填方路段路基(堤)[J]. 公路交通科技, 2002, 19(2): 51—52.
WANG Gang, CHEN Jin-hai, WANG Ming-xing. Apply pressure grouting technique in highway high filled embankment[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2002, 19(2): 51—52.
- [3] 边国强, 李艳, 李鲁泉. 高速公路路堑边坡软弱夹层高压注浆加固的理论与实践[J]. 勘察科学技术, 1999, (6): 36—41.
BIAN Guo-qiang, LI Yan, LI Lu-quan. Theory and practice of high pressure grouting solidification of soft intercalation of the freeway cut slope[J]. **Geotechnical Investigation Surveying**, 1999, (6): 36—41.
- [4] 叶林宏, 何泳生, 冼安如, 等. 论化灌浆液与被灌岩土体的相互作用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 47—55.
YE Lin-hong, HE Yong-sheng, XIAN An-ru, et al. Interactions between chemical grouting and grouted medium[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(6): 47—55.
- [5] 王德群, 黎映宁. 压力注浆技术在高速公路路基病害处理中的应用[J]. 天津建设科技, 2002, 12(3): 4—6.
WANG De-qun, LI Ying-ning. Application of the pressure grouting technique in dealing with highway subgrade disease[J]. **Tianjin Architecture Science and Technology**, 2002, 12(3): 4—6.
- [6] 李宁, 张平, 闫建文. 灌浆的数值仿真分析模型探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 326—330.
LI Ning, ZHANG Ping, YAN Jian-wen. Numerical modeling of grouting in geoenvironment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(3): 326—330.
- [7] 朱宝龙, 胡厚田, 张玉芳, 等. 钢管压力注浆型抗滑挡墙在京珠高速公路K108滑坡治理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 52(2): 399—406.
ZHU Bao-long, HU Hou-tian, ZHANG Yu-fang, et al. Application of steel-tube bored grouting anti-sliding retaining wall to treatment of landslide k108 in Beijing-Zhuhai expressway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 52(2): 399—406.
- [8] 张玉芳. 京珠高速公路108滑坡及防治工程分析[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(6): 633—637.
ZHANG Yu-fang. Analyses of No.108 landslide in Beijing-Zhuhai Highway and its treatment measures[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2003, 38(6): 633—637.
- [9] 周维垣. 岩体力学数值计算方法的现状与展望[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 84—88.
ZHOU Wei-yuan. Present status and development of geomechanics numerical analysis method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1993, 12(1): 84—88.
- [10] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381—3388.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3381—3388.