

DOI: 10.11779/CJGE2022S2040

基于原位监测和模型试验的膨胀土高边坡稳定性分析

任佳丽, 熊勇, 程永辉, 胡胜刚, 胡波

(长江水利委员会长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 以某 25 m 高的膨胀土临时渠道边坡为研究对象, 通过已滑渠坡的现场探槽试验, 发现渠道左右岸在高程 140~142 m 均赋存长大裂隙, 为裂隙强度控制下的边坡失稳; 针对滑裂面的位置和形态, 选取有代表性的渠段开展了预应力伞型锚加固方案设计, 并布置了以锚力和变形为主要监测手段的完整监测断面。针对现有土质边坡锚力监测存在的精度不高等问题, 开展了室内物理模型试验, 研究预应力伞型锚监测土质边坡的适用性。根据原位监测和模型试验成果, 分析了渠坡在开挖、加固及降雨等过程中的稳定状态, 明确了影响渠坡稳定的关键因素及渠坡加固方案的合理性, 并提出了基于锚力监测的膨胀土高边坡稳定状态判别标准。

关键词: 膨胀土边坡; 模型试验; 锚力监测; 稳定状态判别

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0183-06

作者简介: 任佳丽(1983—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事边坡加固和地基处理相关的科学研究咨询工作。E-mail: 23670689@qq.com。

Stability analysis of high expansive soil slopes based on in-situ monitoring and model tests

REN Jia-li, XIONG Yong, CHENG Yong-hui, HU Sheng-gang, HU Bo

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Taking a 25 m-high expansive soil temporary channel slope as the research object, through the field channel tests on sliding channel slope, long and large cracks are found at the left and right banks of the channel in the elevation between 140~142 m, and the slope instability is under the control of crack strength. According to the position and shape of the slip surface, a representative channel section is selected to carry out the design of the prestressed umbrella anchor reinforcement scheme, and a complete monitoring section with anchor force and deformation as the main monitoring means is arranged. Aiming at the low accuracy of the existing soil slope anchor force monitoring, an indoor physical model test is carried out to study the applicability of the prestressed umbrella anchors for soil slope monitoring. According to the results of the in-situ monitoring and model tests, the stable states of the canal slope during the processes of excavation, reinforcement and rainfall are analyzed. The key factors affecting the stability of the canal slope and the rationality of the canal slope reinforcement scheme are clarified. The criterion for stability state judgment of high expansive soil slopes are put forward based on the anchor force monitoring.

Key words: expansive soil slope; model test; anchor force monitoring; safety monitoring; stability criterion

0 引言

膨胀土边坡素有“逢壑必崩, 无堤不塌”之说。膨胀土因具有胀缩性、超固结性和裂隙性, 其工程性质明显区别于一般黏性土, 因此, 膨胀土边坡的稳定性分析和处理措施往往区别于一般黏性土边坡^[1]。国内外众多学者对膨胀土边坡问题进行了大量研究, 但一直存在破坏机理不明, 强度取值方法缺乏科学性以及处理技术缺乏理论指导等问题, 也导致工程建设和运行中大量膨胀土滑坡发生。

滑坡发生的本质是下滑力和抗滑力之间的力学演变^[2-3], 锚力监测可以有效预测土质边坡稳定性, 但因土体的蠕变特性, 常规锚杆难以满足监测锚的精度要求^[4-5]。大量工程实践中发现, 土质边坡监测锚必须满足: 锚力为集中力, 其大小仅随边坡稳定状态变化, 不受其他因素影响; 锚力与边坡失稳过程中滑动力和

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目 (CKSF2019199YT, CKSF 2021460/YT); 安徽省引江济淮集团有限公司科技项目 (YJJH-ZT-ZX-20230118528)

收稿日期: 2022-12-01

抗滑力之间的力系演化存在对应关系；锚力变化特征与边坡稳定状态规律一致。预应力伞型锚^[6]属于“点力监测”，是利用张开后的锚板与深层土体之间的相互作用提供锚力，可有效避免注浆锚杆所受的弯、剪对监测成果的影响，理论上能满足前述土质边坡监测锚的要求，但能否成功应用到实际工程中，还有待进一步研究。

本文以鄂北地区水资源配置工程膨胀土临时渠道边坡为研究对象，首先通过现场探槽试验，探明已滑边坡发生原因和滑裂面位置；针对滑裂面的位置和形态，选取具有代表性的渠坡进行加固方案试验段研究，并布置合理的监测方案；通过室内物理模型试验，研究预应力伞型锚作为监测锚的适用性；根据现场锚力和变形监测成果，分析边坡在开挖、加固及降雨条件下的稳定状态，明确边坡稳定关键影响因素，验证加固方案的合理性，并提出基于锚力的预警标准。

1 工程概况

1.1 滑坡概况

鄂北地区水资源配置工程干线总长 269.67 km，经过膨胀土分布区总长 124.16 km，某段渠道型式为暗涵，长度 7.0 km，临时开挖膨胀土边坡高 25 m，坡比 1:1.5，分段开挖，施工期约为 3~4 个月。在渠道第一分段渠坡开挖至渠底以上 2 m(高程 142.0 m)时，在左、右岸均发生滑坡，严重影响了施工进度及安全。

1.2 滑坡原因分析及滑裂面确定

为探求滑坡发生的原因及滑裂面的形态，在垂直滑坡方向进行了左右岸探槽试验，探槽深度至滑裂面以下，探槽开挖照片见图 1。图 2 为左、右岸探槽揭露的灰绿色黏土填充裂隙面和仅在右岸探槽揭露的无填充蜡状光滑裂隙面。裂隙灰绿色黏土土质细腻，黏粒含量高，天然含水量高于两侧土体，充填厚度一般为 1~5 mm，局部厚度可达 10~15 mm，这类裂隙通常在土层中是闭合的，一旦渠坡的应力状态发生改变（如开挖卸荷等），土体便会沿裂隙面发生破坏^[7]。



图 1 现场探槽开挖图片

Fig. 1 Picture of field trough exploration

图 3 为探槽揭露的沿灰绿色裂隙面形成的滑动

面，左右岸边坡在高程在 140~142 m 之间均赋存长大裂隙。裂隙面以较平直光滑为主、强度低，长大裂隙的存在导致了左右岸均出现边坡失稳，图 4 为根据探槽揭示绘制的左右岸滑坡滑裂面位置和形态。

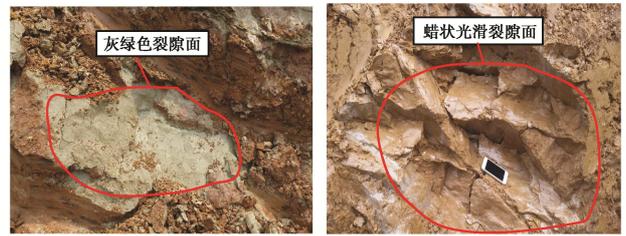


图 2 探槽揭露滑裂面实物图

Fig. 2 Real picture of trough exposed slip crack surface



图 3 探槽揭示的滑动面

Fig. 3 Sliding surface revealed by probe

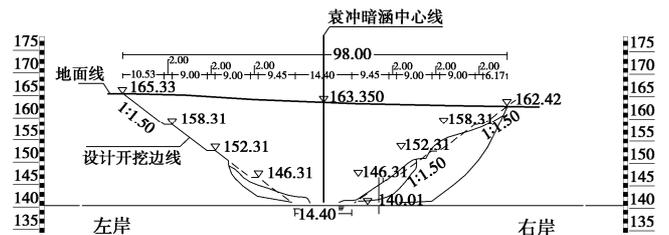


图 4 探槽揭示滑裂面位置

Fig. 4 Location of slip fracture surface

1.3 裂隙面强度参数反分析

将探槽揭露的控制性裂隙的高程、倾角、厚度、长度等空间信息纳入模型，建立膨胀土裂隙边坡计算模型，采用极限平衡分析方法进行参数反分析，由于滑裂面是非圆弧形，边坡的安全系数采用 Morgenstern-price 法求得。

由计算成果可知：裂隙面强度取 $c=10\text{ kPa}$ ， $\varphi=9^\circ$ 时，左岸边坡安全系数为 0.984，边坡失稳。右岸边坡开挖至高程 143 m 时，其安全系数为 1.07，处于稳定状态；当坡脚 3 m 土层全部挖除时，其安全系数为 0.984，见图 5。说明坡脚 3 m 土层开挖前后的安全系数吻合现场开挖垮塌情况，裂隙面强度参数较为合理。

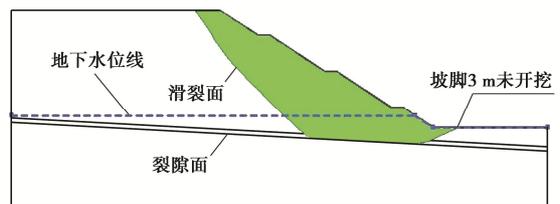


图 5 右岸反算裂隙面强度 (3 m 压重) ($F_s=1.07$)

Fig. 5 Reverse calculation of fracture surface strength at right bank (3 m pressure) ($F_s=1.07$)

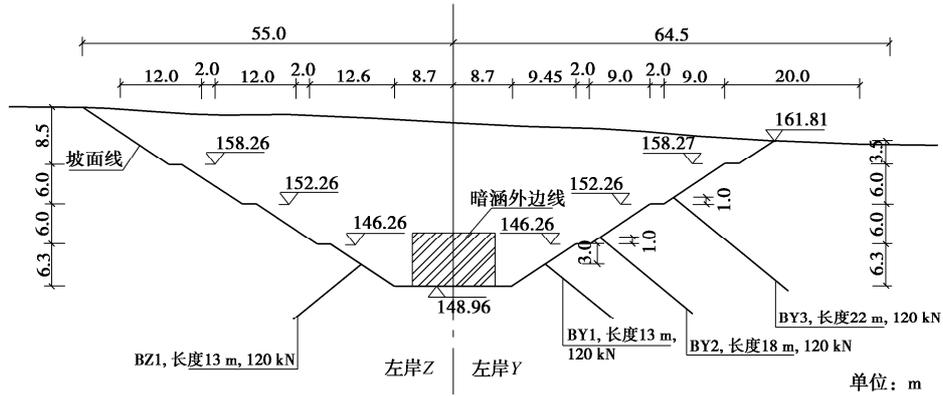


图 6 伞型锚加固断面图

Fig. 6 Reinforcement section of umbrella anchor

1.4 试验段加固方案设计

选取有代表性的 90 m 渠段作为试验段, 针对裂隙性控制膨胀土边坡的特点以及工期紧、开挖裸露时间短等因素, 采用预应力锚进行边坡加固是可行的^[8]。经稳定分析, 在右岸边坡布置 3 排伞型锚, 左岸边坡布置 1 排伞型锚, 临时边坡的稳定性能能够达到 1.05, 即基本稳定状态, 伞型锚加固断面见图 6。

2 监测锚物理模型试验

监测锚的选择直接影响锚力监测成果的准确性及锚力与边坡稳定状态的关系的可靠性。在大量原位锚力监测的基础上, 开展室内物理模型试验, 研究预应力伞型锚作为土质边坡监测锚的适用性。

2.1 试验方案设计

开展室内物理模型试验, 将内锚头固定在模型箱模拟预应力伞型锚, 将外锚头增加让位装置后协同锚力计测试膨胀土边坡失稳过程中锚力的变化特征。膨胀土边坡裂隙面通过塑料薄膜进行模拟, 模型及监测设备见图 7。

2.2 试验成果分析

试验过程中, 采用百分表测试水平位移, 采用特质锚力计测试锚拉力, 采用数码相机对土体的侧面进行拍摄, 以获得真实清晰的滑裂面扩展过程, 试验成果见图 8。



(b) 模型实物图

图 7 模型试验剖面及实物图

Fig. 7 Model test section and physical drawings

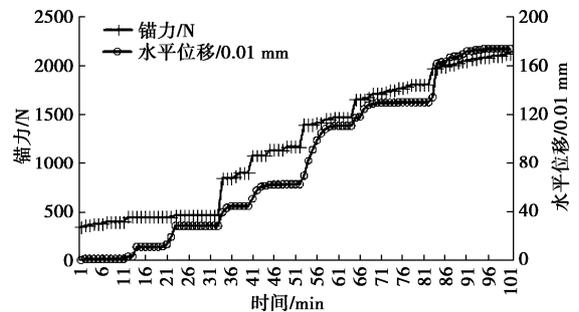
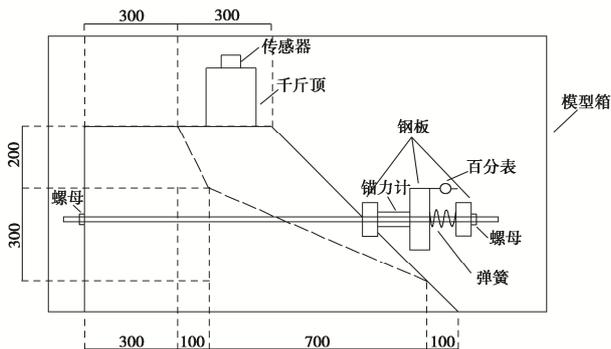


图 8 锚力和水平位移成果曲线

Fig. 8 Curves of anchor force and horizontal displacement

由图 8 可知: ①试验加载至 50 min 时, 水平位移出现突然增大的趋势, 对应的边坡位移明显增大, 结合侧面图像分析, 该模型滑动面贯通存在塑性区扩展的过程, 这个过程中失稳时对应的位移量增大; ②锚力在前期加载过程中停留在预应力值附近, 并未发生明显变化, 当边坡加载至 32 min (6 kN) 时, 锚力明显增大, 出现跳跃性突变特征, 其原因是边坡模型此时自身抗滑力不足以提供足够的抗滑力, 锚参与承担荷载, 体现出较明显的预警特征。

综上所述, 预应力伞型锚可作为土质边坡监测锚; 在边坡失稳过程中, 锚力预警特征的准确性和时效性略好于变形指标。



(a) 模型剖面示意图 尺寸单位: mm

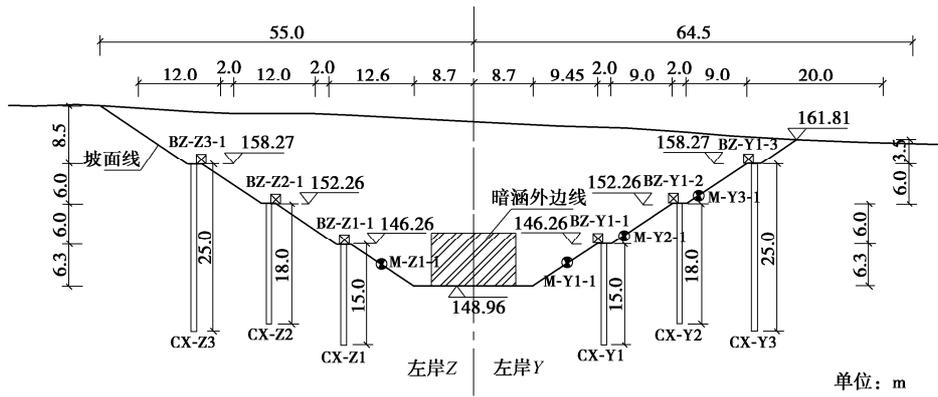


图9 监测断面布置图
Fig. 9 Layout of monitoring sections

3 安全监测

3.1 监测内容及测点布置

土质边坡失稳过程是逐渐形成的，通过有效的监测手段可掌握边坡的稳定状态。土质滑坡的发生主要受地质特性、地形地貌、地下水、降雨、地震及开挖等因素影响，结合本渠段滑坡发生的原因及滑裂面特征，在渠道左右岸各布置了3个完整监测断面，监测项目为：表面变形监测、深层水平位移监测、锚力监测。图9为完整断面监测测点布置图，图中M为锚力，CX为测斜，BZ为表面变形标。在加固、开挖及暴雨天气的监测频率为1~3次/d，遇到变形过大或破坏时，进行24h跟踪监测。

3.2 监测成果分析

监测时间为2016年8月10日—10月30日，共80d。监测期间现场施工及天气情况见表1，水平位移监测成果见图10，深层水平位移(以第三条马道为例)监测成果见图11，左岸边坡的锚力监测成果见图12。

表1 监测期间现场施工及天气情况表

Table1 Field construction and weather situations during monitoring

观测时间	日期/d	施工、天气情况
08-14—09-07	27	锚施工
09-07—09-24	17	高程143~140m坡脚开挖
09-24—09-28	4	暴雨
09-28—10-07	9	左岸变形速率增大
10-07—10-17	10	左岸变形未收敛
10-17—10-20	3	暴雨、左岸变形未收敛
10-20—10-30	10	连续降雨、左岸发生滑坡

图10可知：右岸边坡的表面水平位移均较小，最大位移量为34mm，变形趋于稳定；左岸边坡在9月7日前的开挖和伞型锚施工期间表面水平位移较小，在9月和10月经历暴雨和连续降雨后，水平位移呈增

大趋势，10月26日水平位移突然剧增，其中，第一级马道的变形量为194mm，变形速率为40mm/d，左岸发生较大滑移，10月30日，在对左岸边坡进行坡顶卸载和伞型锚补打后，边坡变形基本趋于稳定。

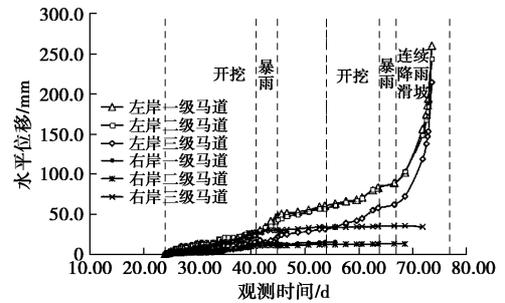


图10 表面水平位移时程曲线

由图11可知：截至10月30日，右岸深层水平位移变形较小，三级马道最大变形值为18mm，渠坡处于稳定状态；左岸深层水平位移明显大于右岸，三级马道最大变形值为185mm，且一级马道处深部位置水平变形明显大于上部水平位移，表明左岸渠坡变形存在滑移翻转。

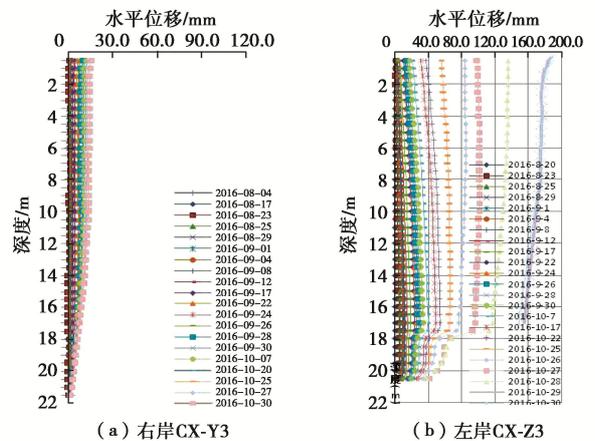


图11 深层水平位移监测曲线

(1) 由图12可知：左岸边坡在10月14日之前，

锚力基本保持不变; 10月14日—10月25日, 经历暴雨和连续降雨后, 锚力增加幅度为 0.73~1.04 kN/d, 10月25日—10月29日, 锚力增加幅度为 5.00~5.27 kN/d, 边坡发生较大滑移, 说明降雨对边坡稳定影响较大。

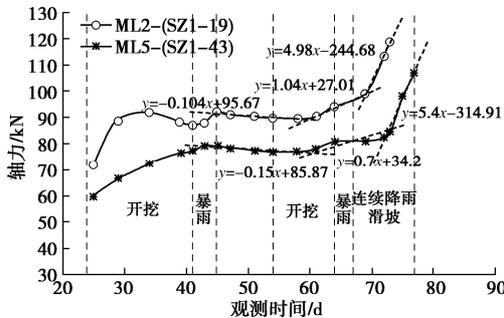


图 12 左岸边坡锚力监测时程曲线

Fig. 12 Curves of anchor force monitoring at left bank slope

右岸锚力在前期土方开挖及暴雨过程中有小幅上升, 增加幅度 16.0%~26.7%, 随后锚力保持平稳, 说明采用三排锚的加固方案是合理的。

4 边坡稳定状态判别

《建筑边坡工程技术规范》规定, 稳定安全状态分为稳定、基本稳定、欠稳定及不稳定。从图 10 表面水平位移时程曲线可知: 左岸表面变形曲线可分为两段, 在变形速率发生剧增后, 边坡直接由进入不稳定或欠稳定状态, 可供应急抢险的时间很短。与表面变形相比, 锚力监测曲线可分为稳定、基本稳定和欠稳定 3 个阶段, 预警模式和标准也更加明确^[9]。

锚力监测可以较好地预测边坡的稳定状态, 如图 12 中 ML2 锚, 在 10 月 14 日之前, 监测锚力基本保持不变或呈小幅度衰减状态, 说明边坡处于稳定状态。10 月 14 日—10 月 25 日, 锚力呈 1.04 kN/d 的幅度增加, 表明边坡内部力系在调整, 锚固抗滑力在增加, 边坡处于基本稳定状态, 此时应注意锚力的变化情况, 若锚力变化幅度呈持续增大趋势, 则边坡将进入欠稳定状态, 若不及时采取处理措施, 边坡将会进入不稳定状态, 发生滑坡。该测点 10 月 25 日—10 月 29 日, 锚力增加幅度为 5.00 kN/d, 锚力增加幅度是基本稳定状态的 5 倍左右, 因此, 可将锚力增加幅度为前期 5 倍作为边坡稳定状态的预警标准。

5 结 论

主要得出以下结论:

(1) 该渠道左右岸边坡在高程 140~142 m 赋存长大裂隙, 裂隙面呈灰绿色黏土填充状和无填充蜡状光滑状, 滑裂面正好处于裂隙带, 因此, 滑坡原因可

判定为裂隙强度控制下的边坡失稳。

(2) 预应力伞型锚可作为土质边坡监测锚, 锚力在边坡失稳过程中, 预警特征的准确性较高, 且预警时效性较变形指标明显提前, 在边坡力学失衡前后出现显著的突变特征。

(3) 左岸边坡在后期持续降雨条件下处于整体滑移状态, 说明左岸采取的单排伞型锚加固方案不足以抵抗整体滑动的失稳, 在坡顶减载和坡脚锚固等应急处理措施后变形收敛达到稳定; 右岸边坡总体是稳定的, 未出现贯通的潜在滑面, 说明右岸边坡采取三排伞型锚加固后, 抑制了深层整体滑动失稳, 所采用的方案是合理的。

(4) 与深层水平位移和表面水平位移相比, 锚力监测更能及时、准确反映边坡的稳定状态, 当锚力增大幅度为前期 5 倍时, 边坡将由基本稳定状态进入欠稳定状态, 可作为膨胀渠坡土稳定性预警标准。

参考文献:

- [1] 卫 军, 谢海洋, 李小对, 等. 膨胀土边坡的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2865 - 2869. (WEI Jun, XIE Hai-yang, LI Xiao-dui, et al. Analysis on slope stability of expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2865 - 2869. (in Chinese))
- [2] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析: 原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (CHEN Zu-yu. Soil Slope Stability Analysis[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (ZHENG Ying-ren, CHEN Zu-yu, WANG Gong-xian. Engineering Treatment of Slope & Landslide[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))
- [4] 朱杰斌. 山区高速公路边坡施工安全监控实践[M]. 武汉: 长江出版社, 2016. (ZHU Jie-bin. Safety Monitoring Practice of Slope Construction in Mountainous Areas[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2016. (in Chinese))
- [5] 郑颖人. 岩土材料屈服与破坏及边(滑)坡稳定分析方法研讨: “三峡库区地质灾害专题研讨会”交流讨论综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 649 - 661. (ZHENG Ying-ren. Discussion on yield and failure of geomaterials and stability analysis methods of slope/landslide—communion and discussion summary of special topic forum on geologic disasters in the Three Gorges Project region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 649 - 661. (in Chinese))