

基于斜坡失稳破坏模式的软弱变质岩区 岩质滑坡易发性评价

李金洋^{1,2}, 余涛^{1,2}, 陈欢^{1,2}, 孙金辉^{1,2}, 赵重^{1,2}

(1.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都 611734; 2.中国地质调查局地质灾害防治技术中心,四川成都 611734)

摘要:滑坡受控于地质环境条件和坡体地质结构,不同地质结构的斜坡失稳破坏的模式存在差异,本文以后龙门山千枚岩区为例,基于现场调查,梳理总结了区内岩质滑坡发生的力学模式与斜坡地质环境、坡体结构之间的关系,进而选取控制滑坡发生的关键因素,运用 ARCGIS 软件的加权叠加功能定量划分了不同模式滑坡的易发区域,主要取得以下认识:(1)滑移-拉裂式滑坡主要发生在坡度 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的顺向飘倾坡内、滑移-溃曲式滑坡发生在坡度 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的顺向伏倾坡内、倾倒变形主要发生在岩层倾角 $>65^{\circ}$ 的反向斜坡内;(2)区内倾倒变形易发区面积为 8.73 km^2 、滑移拉裂易发区面积为 4.31 km^2 、滑移溃曲易发区面积为 3.28 km^2 ,以倾倒变形类型的滑坡为主,已发生滑坡与易发分区结果对比证明了滑坡易发分区与实际情况基本吻合。

关键词:斜坡结构;变质岩;滑坡;易发性

中图分类号:P642.22 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)08-0083-05

Evaluation of Susceptibility to Rocky Landslide in Soft Metamorphic Rock Area Based on Failure Mode of Slope Instability/LI Jin-yang^{1,2}, SHE Tao^{1,2}, CHEN Huan^{1,2}, SUN Jin-hui^{1,2}, ZHAO Zhong^{1,2} (1.Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2.Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: The landslide is controlled by the geological environment conditions and the geological structure of the slope. There are differences in the pattern of slope instability of different geological structures. Take Houlongmen-shan phyllite rock area as an example, based on the field investigation, the relationship between the mechanical model of the rocky landslides in this area & the slope geological environment and the slope structure is summarized, and then select key factors which control the occurrence of landslides, such as slope structure, slope gradient, and slope surface morphology, etc., and use the weighted stack function of ARCGIS software to quantitatively classify the landslide-prone areas of different models. The main understanding are achieved. (1)The phyllite is a layered soft rock. There are 3 types of landslide: "the sliding-tension cracking model", "the creep-bending model" and "scale toppling model". "The sliding-tension cracking model" mainly occurs at a slope of $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ where rock dip more than slope. "the creep-bending model" occurs within the slope of $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ where rock dip less than slope, and "the scale toppling model" occurs in the reverse slope where the rock dip is more than 65° . (2)The overlay analysis based on ARCGIS software showed that: the area of "the scale toppling model" area in the zone is 8.73 km^2 , the area of "sliding-tension cracking" area is 4.31 km^2 , the area of "the creep-bending model" area is 3.28 km^2 , and the landslide type is dumped. The result of the comparison of landslides and areas with high incidence of landslides has proved that the landslide-prone areas basically agree with the actual conditions.

Key words: slope structure; metamorphic rock; landslide; susceptibility

0 引言

斜坡失稳破坏是一种常见的重力地质现象^[1],滑坡又是斜坡失稳破坏中的一种类型,目前对滑坡

力学模式的研究相对较为成熟,黄润秋、张倬元、王兰生等^[2-3]对我国 20 世纪以来大型滑坡进行系统性分析,得出了岩质滑坡的地质-力学模式,包括:滑

收稿日期:2018-07-01

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“涪江流域 1:5 万环境地质调查”(编号:DD20160251)

作者简介:李金洋,男,汉族,1988 年生,地质工程专业,主要从事地质灾害调查与防治方面的研究工作,四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路 139 号,316053914@qq.com。

移-拉裂式、挡墙溃决式、平推式、倾倒变形模式、蠕滑(弯曲)-剪断模式等。每一类模式都具有其对应的岩体结构条件或斜坡结构条件,国内外学者对特定滑坡模式的斜坡地质结构特征进行了大量研究^[4-6],证实了斜坡地质结构特征对滑坡的控制作用。

滑坡易发性评价是近年来国内外滑坡研究领域的热点问题之一^[7],近年来,马力等^[8-13]运用多种方法进行了易发性评价工作,取得了较为丰富的成果。开展滑坡易发性评价除了运用有效的评价方法外,最为关键的环节在于合理的选取评价因子^[14],滑坡发生与否与其所在的斜坡环境条件密切相关,包含了气象水文、地质地貌、工程地质及人类活动等多方面的影响因素^[15],且不同地区、不同类型的滑坡控制因素存在差异,如何准确的判别特定类型滑坡的易发性、易发程度,对评价因子的选取就尤为重要,本文以后龙门山区层状软弱千枚岩区为例,归纳总结滑坡破坏模式基础之上,分析不同破坏模式滑坡的地质条件,并对主控地质因子进行分门别类地定量和量化研究之后,运用 ARCGIS 软件的加权叠加功能定量划分了不同模式滑坡的易发区域,尝试确立更加适合研究区的滑坡易发性评价的方法。

1 影响滑坡失稳模式的因素分析

1.1 研究区地质地貌条件

研究区地貌上总体为构造剥蚀和河流侵蚀作用形成的深切高山区,河谷切割深,地形高差悬殊,地势险峻,全区平均海拔高度在 1800 m 左右,最高处海拔高达 3200 m,平均高差 500~800 m。区内出露地层为志留系茂县群(*Smx*)千枚岩,受区域构造影响,岩层总体倾向 NW,倾向陡立,多大于 40°,岩体劈理面发育,切割岩体呈层状结构,主要发育一组 NE 走向的构造结构面。总体来看,研究区岩性单一,影响基岩滑坡的主要因素为斜坡结构特征及地貌特征。

1.2 影响滑坡失稳模式的地质因素

斜坡地质结构与斜坡的破坏型式有着非常明显的对应关系^[15],基于岩层倾向与斜坡坡向的组合关系,对层状结构斜坡进行了划分,岩层倾向与坡向的夹角 $\alpha < 30^\circ$ 时顺向坡、 $30^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时为顺切坡、 $60^\circ \leq \alpha < 120^\circ$ 时为横向坡、 $120^\circ \leq \alpha < 150^\circ$ 时为逆切坡、 $150^\circ \leq \alpha < 180^\circ$ 时为逆向坡,又根据岩层倾向与坡度

的组合关系,进一步将顺向坡中岩层倾角大于坡度的情况划分为顺向飘倾坡、岩层倾角小于坡度的情况顺向伏倾坡。区内千枚岩劈理面发育,岩体多为薄层状,构造结构面与层面倾向近相垂直,因此,滑坡容易发生在顺向坡中,顺向飘倾坡中岩层倾角小于坡角,有利于不稳定岩体(块体)的剪出,岩体容易沿中-缓倾坡外的层面发生顺层滑移;顺向伏倾坡中,岩层倾角大于坡度,加之软岩强度较低,在重力长期作用下,坡脚处岩体发生弯曲变形,最终溃曲演变成滑坡。而在岩层倾角陡立的反向坡中,斜坡表层岩体风化卸荷强烈,则易发生倾倒变形。因此,区内岩质滑坡主要有 3 种破坏模式,分别为:滑移-拉裂、滑移-溃曲及倾倒变形,见图 1。

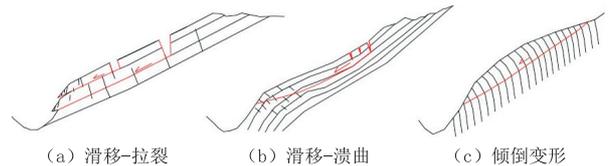


图 1 滑坡模式图

滑坡是否发生不仅仅与斜坡结构特征有关系,同时受微地貌特征的影响,现场调研发现,3 种模式的滑坡均发生在凸型坡中,顺层滑坡一般在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 、倾倒变形坡度范围在 $40^\circ \sim 60^\circ$,见表 1。

表 1 不同模式滑坡的地质地貌特征

滑坡模式	斜坡结构特征	地貌特征
倾倒变形	反向坡,岩层倾角 $> 65^\circ$	斜坡坡面形态为凸型、坡度 $40^\circ \sim 55^\circ$
滑移-拉裂	顺向坡,岩层倾角 $15^\circ \sim 35^\circ$ 且倾角小于坡角	斜坡坡度 $30^\circ \sim 45^\circ$,斜坡坡面形态为凸型
滑移-溃曲	顺向坡,岩层倾角 $35^\circ \sim 50^\circ$ 且倾角大于坡角	斜坡坡度 $30^\circ \sim 45^\circ$,斜坡坡面形态为凸型

2 滑坡易发性评价

2.1 数据来源与评价因子的选取

本次评价选取 1:50000 图幅调查范围,DEM 数据来源于 1:50000 地形图生成,分析斜坡结构所需的岩层产状来源于区域地质图。基本要素图层见图 2~图 5。

影响滑坡发生的因素较多,主要包括:地形地貌、地层岩性、斜坡结构、地质构造、植被、降雨、人类工程活动等。降雨及人类工程活动被视为是滑坡发生的诱发因素,而本文只作易发性评价,因此不考虑降雨等诱发因素,只考虑影响滑坡发生的内在条件。

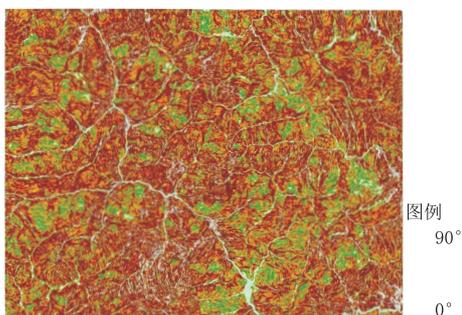


图 2 坡度分布图



图 3 坡向分布图

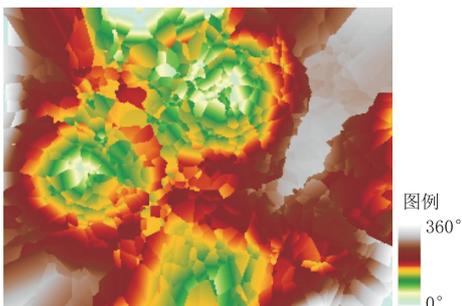


图 4 岩层倾向插值结果图

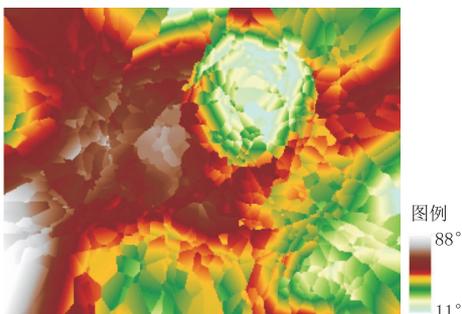


图 5 岩层倾向角插值结果图

研究区整体处于茂汶断裂的韧性剪切带中,区内岩性为单一的志留系茂县群千枚岩、植被覆盖率达 90% 以上且斜坡上覆盖较为均匀,以上因素在评价区域内差异性不强,不易区分其对滑坡灾害的影响,因此对以上因素也不予以考虑。通过现场调研以及对已发生滑坡的分析认为:影响区内滑坡发生的主

要内在因素为斜坡结构及微地貌特征,故选取斜坡结构、地形坡度及斜坡表面形态作为评价指标。

2.2 评价因子分级与图层建立

要在 ARCGIS 中实现各个因子的叠加分析,在对评价因子进行分级之后,须进行分级因子的赋值。为了便于计算过程中进行区分,对赋值做如下规定:有利于滑移-拉裂滑坡发生的等级因子赋值为 1、有利于滑移-溃曲的等级因子赋值为 10、有利于倾倒变形的等级因子赋值为 100、对滑坡的发生无影响的因素赋值为 0。各因子分级赋值情况见表 2。

表 2 各因子分级及赋值

因子图层	因子分级与赋值			
斜坡结构	顺向飘倾坡	顺向伏倾坡	逆向坡	其他斜坡
	1	10	100	0
岩层倾角	<15°	15°~35°	35°~50°	50°~65° >65°
	0	1	10	0 100
坡度	<30°	30°~45°	40°~55°	>55°
	0	1 或 10	100	0
斜坡表面形态	凹型坡	直线型坡	凸型坡	
	0	0	1 或 10 或 100	

2.2.1 斜坡结构

运用预先处理好的岩层产状矢量数据在 ARCGIS 软件中进行插值,插值方法选取克里金法,插值结果见图 4、图 5,插值获得的岩层倾向栅格数据地形坡度在栅格计算器中相减获得斜坡结构,根据上述分析,调查区岩质滑坡在横向坡、切向坡中基本不发育,在顺向坡和逆向坡中发育,为了便于评价,将顺向坡、逆向坡以外的其他结构斜坡统一为其他结构斜坡,最终将斜坡结构划分为:顺向飘倾坡、顺向伏倾坡、逆向坡和其他斜坡,根据上述赋值规定,依次赋值为 1、10、100、0,见图 6。根据 3 种类型斜坡发生的岩层倾角范围,将岩层倾角栅格数据重分类为:<15°、15°~35°、35°~50°、50°~65° 及 >65° 五类,分别赋值为:0、1、10、0、100,见图 7。

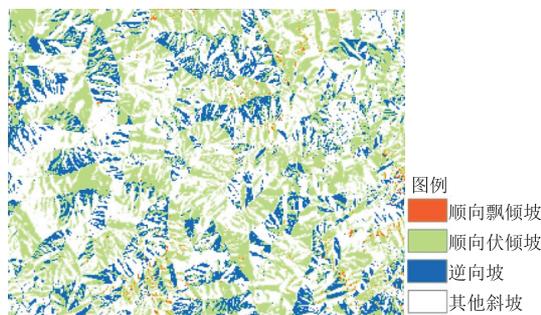


图 6 斜坡结构分类图

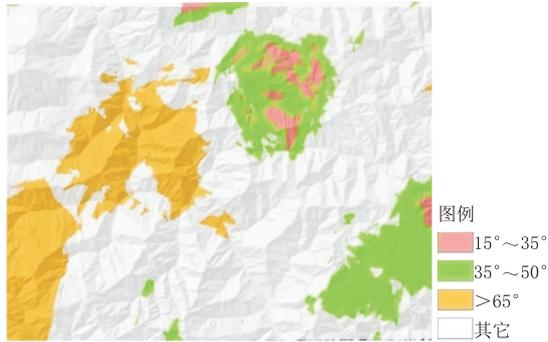


图7 岩层倾角分级图

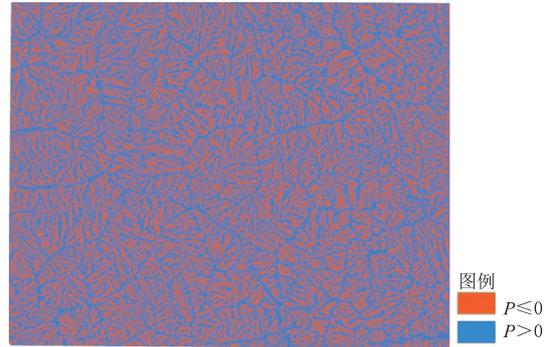


图9 斜坡形态分级图

2.2.2 坡度

坡度是滑坡发生的一个重要控制因素,研究区地质灾害调查显示,滑移-拉裂式、滑移-溃曲式滑坡发育在 30°~45°的坡度范围,倾倒变形式滑坡发育在坡度相对较陡的地段,坡度范围为 40°~60°。本文利用 ARCGIS,从 1:5 万 DEM 数据中提取坡度信息,并进行坡度重分类,分为:<30°、30°~45°、40°~60°、>60°四类,分别将栅格赋值为 0、1 或 10、100、0,见图 8。

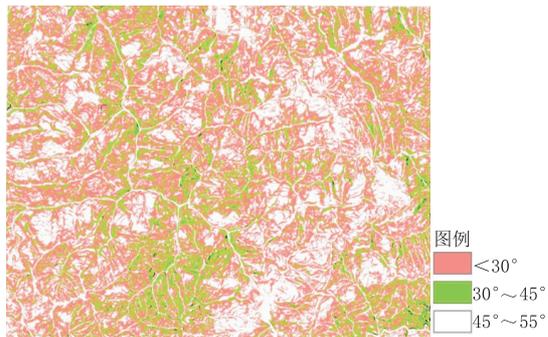


图8 地形坡度分级图

2.2.3 斜坡表面形态

斜坡表面形态可分为直线型、凸形坡和凹形坡 3 种基本类型。在 GIS 中坡形可以利用地表的曲率 P 进行描述和量化。当地表曲率 $P > 0$ 时,坡形为凸形坡;当地表曲率 $P = 0$ 时,坡形为直形坡;当地表曲率 $P < 0$ 时,坡形为凹形坡,将凹型坡与直线型坡赋值为 0、根据需要将凸型坡赋值为 1 或 10 或 100,见图 9。

2.3 易发性评价结果

根据表 2 中已分级、赋值完毕的各项指标因子,在 ARCGIS 软件中的栅格计算器命令对各项分级指标进行叠加,将叠加结果划分为易发与不易发,根据最初拟定好的赋值方式,叠加结果为 0 的区域为

岩质滑坡不易发区域,叠加结果不为 0 的区域为 3 种类型岩质滑坡的易发区,其中,叠加结果 <10 的整数叠加区域为滑移-拉裂式滑坡易发区、叠加结果 <100 的整数区域为滑移-溃曲式滑坡易发区、叠加结果 >100 的整数区域为倾倒变形滑坡的易发区域,见图 10。

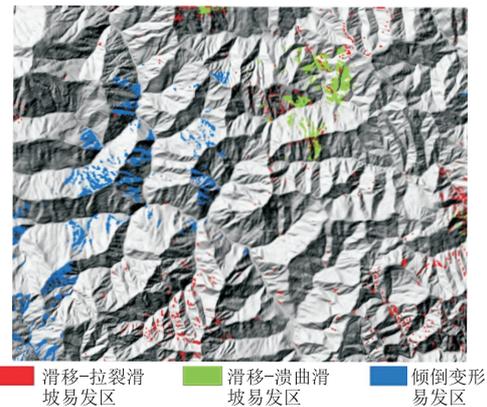


图10 易发性分区图

研究区总面积 436 km²,统计结果显示:滑移-拉裂式滑坡易发区面积为 4.31 km²、滑移-溃曲式滑坡易发区面积 3.28 km²、倾倒变形滑坡的易发区域 8.73 km²,表明研究区滑坡失稳破坏方式为主;滑移-拉裂式滑坡分布较为零散,表明研究区该类滑坡规模一般较小,与现场调查情况相吻合。将现场调查的几处岩质滑坡与易发性分区结果进行对比校验,不同类型的滑坡均落在相应的易发区内,证明了本次基于斜坡模式的易发性分区具有较高的可靠性。

3 结论与讨论

本文在分析区内滑坡破坏模式、影响因素的基础之上,运用 ARCGIS 软件的加权叠加功能定量划

分了不同模式滑坡的易发区域,主要取得以下认识:

(1)千枚岩为层状软弱岩,区内发育有:滑移-拉裂、滑移-溃曲及倾倒变形 3 种类型的滑坡,滑移-拉裂主要发生在坡度 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的顺向飘倾坡内、滑移-溃曲发生在坡度 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的顺向伏倾坡内、倾倒变形主要发生在岩层倾角 $>65^{\circ}$ 的反向斜坡内;

(2)基于 ARCGIS 软件的叠加分析表明:区内倾倒变形易发区面积为 8.73 km^2 、顺层滑移易发区面积为 4.31 km^2 、滑移溃曲易发区面积为 3.28 km^2 ,以倾倒变形类型的滑坡为主,已发生滑坡与易发分区结果比对证明了滑坡易发分区与实际情况基本吻合。

参考文献:

- [1] 李铁峰.基岩斜坡变形与破坏的岩体结构模式分析[J].北京大学学报(自然科学版),2002,38(2):239-244.
- [2] 张倬元,王士天,王兰生,等.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,2009.
- [3] 黄润秋.20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-452.
- [4] 殷跃平.三峡库区边坡结构及失稳模式研究[J].工程地质学报,2005,13(2):145-154.
- [5] 祁生文,许强,刘春玲,等.汶川地震极重灾区地质背景及次生

斜坡灾害空间发育规律[J].工程地质学报,2009,17(1):40-49.

- [6] 柴波,殷坤龙,陈丽霞,等.岩体结构控制下的斜坡变形特征[J].岩土力学,2009,30(2):521-525.
- [7] 陈伟.大比例尺评价尺度强震条件下崩滑灾害易发性评价方法[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2011,26(4):31-36.
- [8] 高克昌,崔鹏,赵纯勇,等.基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价—以重庆万州为例[J].岩石力学与工程学报,2006,25(5):991-996.
- [9] 许冲,戴福初,姚鑫,等.基于 GIS 与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J].工程地质学报,2010,18(1):15-26.
- [10] 范林峰,胡瑞林,曾逢春,等.加权信息量模型在滑坡易发性评价中的应用—以湖北省恩施市为例[J].工程地质学报,2012,20(4):508-513.
- [11] 武雪玲,任福,牛瑞卿,等.斜坡单元支持下的滑坡易发性评价支持向量机模型[J].武汉大学学报:信息科学版,2013,38(2):1499-1503.
- [12] 马力,李立军,赵彦宁,等.基于 GIS 空间分析的吉林省辉南县地质灾害易发程度评价[J].吉林地质,2014,33(2):106-111.
- [13] 王佳佳,殷坤龙,肖莉丽.基于 GIS 和信息量的滑坡灾害易发性评价—以三峡库区万州区为例[J].岩石力学与工程学报,2014,33(4):797-808.
- [14] 陈昌喜,胡时友,石胜伟,等.斜坡地质灾害的空间预测问题[J].工程地质学报,2007,15(2):179-185.
- [15] 陈喜昌.河谷岸坡类型的划分原则与方法[J].西南地质科技情报,1989,53(2):25-30.

(上接第 82 页)

的作用,使得锚固段整体受力分布均匀,更能充分发挥锚索的承载力。在锚固段全长范围内均有应力分布,应力达到锚固力设计值的 50% 以上,应力分布最大偏差不超过 10%。

经对比可见,自承载式预应力锚索不仅有注浆即可张拉发挥锚固用的特点,自承载式预应力锚索锚固段的应力分布均匀,能充分发挥锚固全长的锚固作用。

4 结论

(1)自承载式预应力锚索具有安装后不注浆即可张拉的特点,初始张拉力可达设计锚固力的 50%~100%。

(2)自承载式预应力锚索锚固段的应力分布均匀,能充分发挥锚固段全长的锚固作用,优于普通拉力集中型预应力锚索。

(3)自承载式预应力锚索结构可以满足岩质滑坡应急快速锚固的要求。

(4)希望通过以后的研究工作,对自承载式预应力锚索在不同岩层中的适宜性进行研究,形成自承

载式预应力锚索系列产品,能让自承载式预应力锚索应用于地质灾害治理工程中,达到快速锚固的目的。

参考文献:

- [1] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M].北京:人民交通出版社,2010.
- [2] 王恭先.滑坡防治工程措施的国内外现状[J].中国地质灾害与防治学报,1998,(1):1-9.
- [3] 梁炯望.锚固与注浆技术手册[M].北京:中国电力出版社,1999.
- [4] 朱宝龙,杨明,胡厚田,等.类土质边坡锚固特性的试验研究[J].岩土力学,2004,25(12):1924-1927.
- [5] 唐攀,王杰.注浆技术的发展概况[J].海军工程技术,2003,(1):25-27.
- [6] 陆观宏,莫海鸿,倪光乐.一种新型锚杆扩孔技术[J].岩土工程界,2005,(12):45-47.
- [7] 赵建国,陆观宏.扩孔锚杆技术应用于建筑物抗浮工程[M].北京:中国环境科学出版社,2006.
- [8] 刘明振.扩底土锚抗拔承载机理的试验研究[J].西安建筑科技大学学报,1996,28(2):186-190.
- [9] 陆观宏,曾庆军,黄敏,等.锚杆扩孔技术应用于某高层建筑基础加固[J].土工基础,2011,(10):20-26.
- [10] 陆观宏.新型可回收锚索的研究[D].广东广州:华南理工大学,2003.
- [11] 日本预制混凝土框架协会.预制混凝土框架锚固设计施工指南[M].东京:日本欧姆社,1994.