

文章编号: 1000-7598-(2009)01-0040-05

土钉技术补强土质古窑受拉破坏裂缝

柴新军¹, 林重德², 杨泽平¹, 易萍华¹, 侯龙清¹

(1. 东华理工大学, 土木与环境工程学院, 江西 抚州 344000; 2. 佐贺大学, 低平地研究中心, 日本 佐贺市 840-8502)

摘 要: 保护土遗址免遭损坏是一个难题。土钉锚杆技术在加固保存石质遗迹方面应用较多, 而在土质遗址补强方面的应用则鲜有报道。船迫 2 号窑为一土质古窑, 在移去古窑内部回填土的过程中, 最薄弱断面部位出现受拉破坏裂缝。应用有限差分程序 FLAC, 在稳定性评价的基础上模拟分析了微型土钉补强该受拉破坏裂缝的可行性。参数研究包括土钉长度、倾斜角、间距和孔径等对补强效果的影响。考虑现场施工空间的限制和土遗址保存对外观的要求, 提出了合理的补强设计和施工方案。微型土钉技术补强受拉破坏裂缝的成功实施, 为土遗址的加固补强提供了典型案例, 具有一定的借鉴意义。

关 键 词: 土质古窑; 受拉裂缝; 土钉; 数值模拟; 补强设计

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Reinforcing tensile cracks of historical earthen kiln with soil nailing technique

CHAI Xin-jun¹, HAYASHI Shigenori², YANG Ze-ping¹, YI Ping-hua¹, HOU Long-qing¹

(1. East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China; 2. Institute of Lowland Technology, Saga University, Saga 840-8502, Japan)

Abstract: Preservation of historical earthen sites against damage is one of the difficult problems. Rock bolt and soil nailing techniques, with its characteristics of in-situ reinforcement, has been frequently applied to strengthen rock-based ruins, yet their applications to earthen ruins are seldom reported. Dougaeri No.2 historical ruin is an underground historical earthen kiln, tensile cracks have been developed at the poorest location while removing the backfilled soil inside of the kiln. Finite difference method code- FLAC has been employed to evaluate the effectiveness of micro-soil nailing technique for reinforcing the tensile cracks. Parameter studies are performed to investigate the effect of nail length, inclination angle, spacing and diameter of drill hole. Considering the field practical condition and the specific requirements for the appearances of the earthen kiln's preservation, reasonable reinforcement design and practice method have been presented. The successful application of micro-soil nailing for reinforcing tensile cracks of the kiln will be of benefit to the preservation of underground soil-ruins.

Key words: historical earthen-kiln; tensile cracks; soil nailing; numerical simulation; reinforcement design

1 引 言

近年来我国对古代岩土文物遗址的保护日渐受到社会的重视^[1-3]。土钉和锚杆技术以其原位加筋的特点, 在加固石窟、壁画、古墓、石雕、塑像等石质遗迹方面的应用较多^[4-6], 然而, 在土质遗址加固保存方面的应用则鲜有报道^[7-8]。本文阐述了微型土钉技术补强日本九州船迫土质古窑受拉破坏裂缝的成功实例, 为土钉技术在加固补强土遗址方面的应用提供参考和借鉴。

船迫古遗迹群位于日本福冈县北九州市船迫町, 是茶臼山东窑迹群、宇土窑迹群、堂加窑迹群

的总称, 其中堂加窑迹群 2 号窑址 (简称 2 号窑) 大约修建于公元 8 世纪中叶, 主要用于烧制修建丰前国分寺 (建于公元 756 年) 所需屋瓦, 为国家级指定历史文化保护遗迹^[9]。2 号窑发掘于 1996 年, 其内部形状照片见图 1, 是长约 10 m 的台阶形烧瓦窑。该古窑开挖拍照后复埋置于土中, 以方便加固补强方案的确定和实施。古窑位于风化花岗岩丘陵地带的斜坡位置, 土质属于含黏性成分较多的砂质黏土, 土颗粒级配曲线如图 2 所示。

2 号古窑断面形状较复杂, 经试验论证, 加固方案确定为微型化学注浆技术和微型土钉技术相结合, 微型土钉用以实现窑址表层烧结部和内部一体

收稿日期: 2007-07-03

基金项目: 东华理工大学博士基金资助项目 (No. DHB0602); 教育部留学回国人员科研启动基金资助 (教外司留[2008]890 号)。

作者简介: 柴新军, 男, 1970 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、环境岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: xj_chai@126.com

化加固,微型化学注浆技术用以遗址表层土的固化处理。对2号窑实施实质性加固补强之前,采用数值模拟分析的方法对其稳定性进行了评价^[10-11]。通过选取典型断面,将2号古窑复杂的三维问题简化为3种类型断面的平面问题。模拟分析结果表明,最薄弱断面的形状为Cave型断面,其最不利的状态为抗张拉强度较低时可能出现张拉破坏,如图3所示,该状态相应的安全系数 $F_s = 1.45$,明显小于其他几种情形($F_s \geq 3.45$)^[10]。

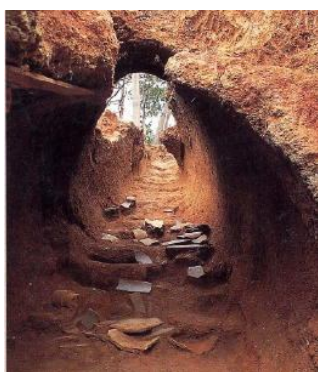


图1 堂加2号土质古窑照片

Fig.1 Photo of Dougaeri No.2 earthen kiln

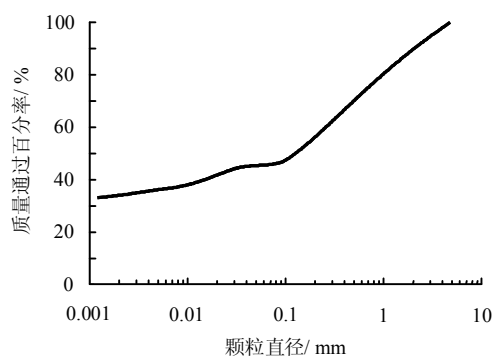


图2 2号窑址土颗粒级配曲线

Fig.2 Particle size distribution of kiln site

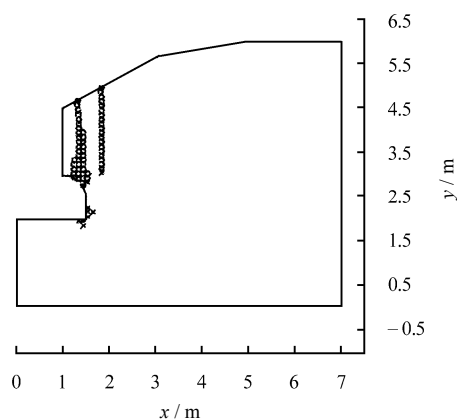


图3 Cave型断面张拉破坏模式(4 kPa, $F_s = 1.45$)

Fig.3 Tensile failure mode for Cave-type of geometry (4 kPa, $F_s = 1.45$)

2004年,对2号古窑迹实施面层化学注浆固化处理。在开挖移去古窑内部回填土的过程中发现Cave型断面坡肩部位出现受拉破坏裂缝,如图4所示。为保持古窑的完整和稳定,现场采取紧急措施堆放土袋进行临时支护,以进一步确定加固补强措施。现场量测表明,该张拉裂缝距离窑迹内侧面约1.10 m,裂缝深度达0.8 m,与模拟分析结果(图3)非常吻合,而其他部位却没有发现破坏痕迹。进一步的调查表明当时正值雨季,遗址土含水率较高是导致土体抗张拉强度降低,进而引起受拉破坏的主要原因。该受拉破坏裂缝的意外发生从一个侧面验证了模拟分析结果的可靠性^[11]。



图4 Cave型断面部位现场张拉破坏裂缝

Fig.4 Tensile cracks developed at Cave-type of geometry during field practice

在稳定性分析的基础上,本文应用有限差分程序FLAC中的桩单元模型模拟微型土钉,对Cave型断面处的受拉破坏裂缝进行补强设计。主要评价要素有土钉长度、倾斜角、土钉设置间隔和钻孔直径,特别是考虑到现场的施工空间限制和土遗址保存对外观的特殊要求,分析了土钉设置为负倾斜角时补强受拉破坏裂缝的效果,提出了具体的土钉设置参数和施工方法,并应用于工程实际。微型土钉技术补强2号土质古窑受拉破坏裂缝的成功实施,为土钉技术加固补强土质遗址的应用提供了典型案例,具有一定的参考借鉴意义。

2 数值模拟分析方法

2.1 建立有限差分单元网格模型

Cave型断面模拟边界类型、大小和单元网格的划分完全同古窑稳定性分析^[11]如图5所示。模拟分析边界尺寸定为宽7.0 m、高6.0 m,以减小边界对模拟结果的影响。为模拟局部剪切带的形成和发展过程,采用细密单元网格,宽、高方向分别采用70和60个单元。左、右边界固定水平位移,底部边界固定水平和垂直位移,古窑内侧前面及顶部为自由

边界。采用摩尔-库仑弹塑性模型模拟古窑砂质黏土。模拟分析所采用的土质参数是结合拉拔试验和室内三轴试验而确定（含水率为 33 % 的状态），见表 1，其中土的抗张拉强度 4 kPa 为估算的模拟状态下可能的较低表观抗张拉强度。

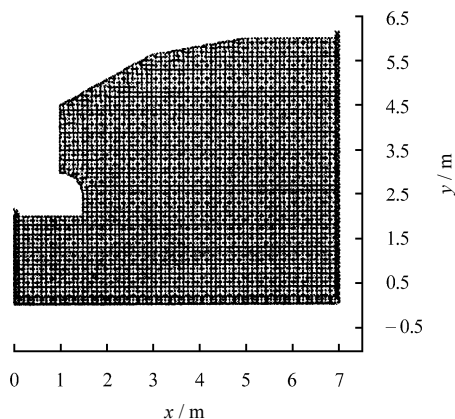


图 5 Cave 型断面单元网格

Fig.5 Grid mesh for Cave-type of geometry

表 1 模拟分析中所用土质参数

Table 1 Soil parameters used in simulation analysis

密度	剪切模量	体积模量	黏聚力	内摩擦角	抗张拉强度
$\rho_d / (\text{g/cm}^3)$	G / kPa	K / kPa	c / kPa	$\phi / (^\circ)$	σ_t / kPa
1.30	3 000	5 000	40	20	4

2.2 土钉设置参数

本次研究采用有限差分程序 FLAC 中的桩单元模型模拟土钉，可以考虑轴力、剪力和弯矩的作用。主要评价要素有土钉长度 L 、土钉设置倾斜角 α 、土钉设置间隔 S （图 6）。为比较土钉孔径的影响，将两种孔径的土钉用于数值模拟分析，其一为 D7（芯材直径为 3 mm、孔径为 7 mm），另一种为 D50（芯材直径为 30 mm、钻孔直径为 50 mm）。土钉-土相互作用时破坏面假定出现在孔壁部位，该界面单元服从摩尔-库仑破坏准则。采用强度折减法模拟分析各种土钉设置情形下可能的破坏模式和相应的安全系数。

3 结果与讨论

(1) 土钉长度 L 的影响

研究土钉长度对 Cave 型断面稳定性的影响时，土钉倾斜角和间距设置为固定值，分别为 $\alpha = 0^\circ$ 、 $S = 0.3 \text{ m}$ 。安全系数与土钉长度关系见图 7。建议土钉设计长度不小于 2.0 m。

图 7 显示在给定的相同条件下小直径土钉 D7 比大直径土钉 D50 效果更好，这个现象主要原因是

在模拟分析时假定土钉末端端部与土体界面为光滑接触，该界面上抗剪强度、抗拉强度为 0。当张拉破坏面出现在土钉末端端部时，D7 情形比 D50 具有更大的抗张拉破坏截面面积。

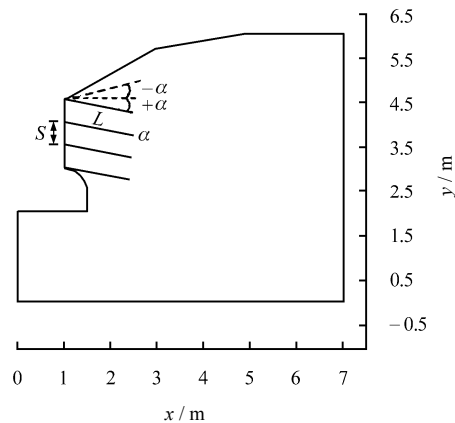


图 6 Cave 型断面土钉补强设置示意图

Fig.6 Layout of nails for reinforcing Cave-type of geometry

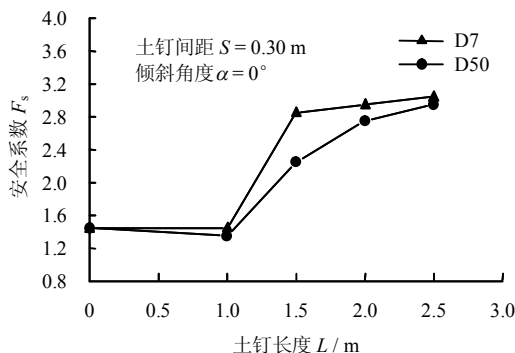


图 7 安全系数-土钉长度关系

Fig.7 Factor of safety vs. length of nails

(2) 倾斜角 ($+\alpha$) 的影响

研究土钉倾斜角 ($+\alpha$) 对 Cave 型断面安全系数 (F_s) 的影响时，土钉长度和土钉间距取固定值，分别为 $L = 2.0 \text{ m}$ 和 $S = 0.30 \text{ m}$ 。土钉倾斜角-安全系数关系如图 8 所示。分析结果表明在给定条件下土钉水平设置效果最好。

(3) 土钉间隔 (S) 的影响

研究土钉设置间隔的影响时土钉倾斜角和土钉长度均取固定值， $\alpha = 0^\circ$ ， $L = 2.0 \text{ m}$ 。安全系数与土钉间隔关系如图 9 所示。分析结果表明，对于 D7 和 D50 两种情形均有一个界限间隔，分别为 0.4 m 和 0.7 m。超过界限间隔，安全系数急剧降低。D7 和 D50 界限间隔的不同反映了土钉孔径大小对锚固的影响。

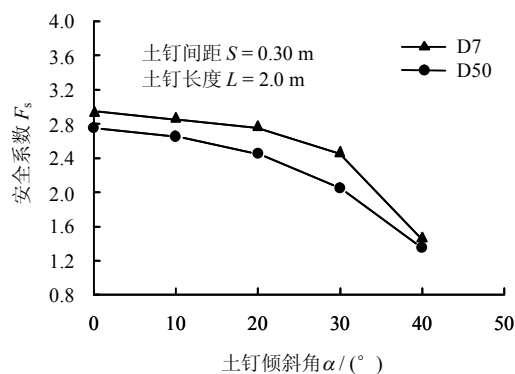


图8 安全系数-土钉倾斜角 ($+\alpha$) 关系
Fig.8 Factor of safety vs. inclination angle

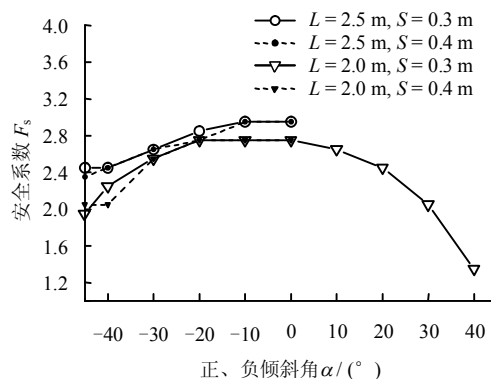


图10 安全系数-正、负倾斜角 ($\pm\alpha$) 关系
Fig.10 Factor of safety vs. inclination angle ($\pm\alpha$) of nails

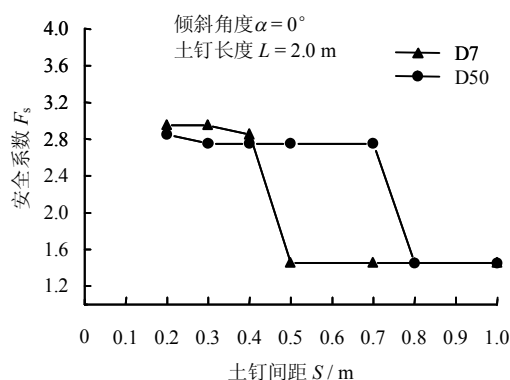


图9 安全系数-土钉间距关系
Fig.9 Factor of safety vs. spacing of nails

综上对 Cave 型断面张拉裂缝部位, 建议采用 D50 土钉, 参数设置为: $L \geq 2.0$ m, $\alpha = 0^\circ$, $S = 0.3$ m。

4 施工考虑

在现场实际条件下, 2 号窑内部空间狭小, 宽度约 0.8~1.2 m。水平方向或正倾斜角安置长度为 2.0 m 的土钉难以实施。经现场调查分析, 决定从古窑后部斜坡位置沿负倾斜角方向安装土钉。为此, 同样采用数值方法对正、负倾斜角安装土钉的效果进行了模拟对比分析。

模拟分析中, 土钉采用 D50, 土钉长度分 2.0 m 和 2.5 m 两种情况, 土钉间距分 0.3 m 和 0.4 m 两种情形进行对比分析。安全系数与正负倾斜角关系如图 10 所示。该分析结果清楚地表明, 对于 Cave 型断面, 在相同的条件下负倾斜角设置土钉稳定效果 (安全系数) 优于正倾斜角安装的情形。综合考虑施工时对遗址的扰动和灌浆的可行性, 土钉倾斜角确定为 $\alpha = -30^\circ$ 。进一步模拟分析表明, 土钉末端距离古窑内前侧面距离以不大于 0.3 m 为宜。

根据模拟分析结果, 对 Cave 型断面受拉破坏裂缝部位, 最终加固补强方案设计为: 面层厚 0.3~0.5 m 时采用化学加固剂 (硅酸乙酯, Silicic acid ethyl. ester) 固化处理; 采用 D50 土钉补强受拉破坏裂缝, 参数设置为: $L \geq 2.0$ m, $\alpha = -30^\circ$, $S = 0.3$ m, 补强方案如图 11 所示, 则相应的安全系数提高为 $F_s = 2.55$ 。

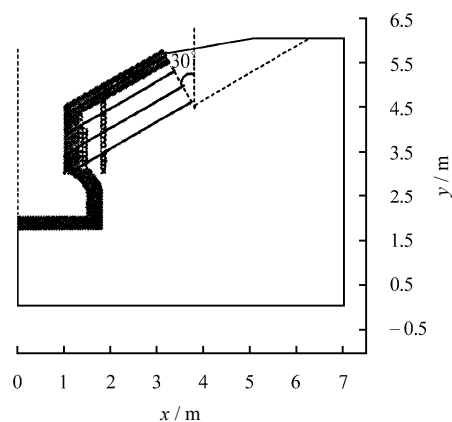


图11 Cave 型断面受拉破坏补强设计示意图
Fig.11 Design of reinforcing tensile cracks for Cave-type of geometry

现场安置土钉的施工方法是在距离古窑前侧面约 2.0 m 处开挖 V 型土槽 (图 11), 以 $\alpha = -30^\circ$ 的倾斜角安置微型土钉。安装土钉时需要精确计算, 确保土钉末端距离侧面距离约为 0.1~0.3 m, 最后回填遗迹土于土槽, 恢复原地貌。

该加固补强方案已成功地应用到工程实践。加固补强完成后 2 号窑内部照片如图 12 所示, 为方便参观和保护该遗址避免雨水的侵蚀劣化, 古窑外部修建了顶棚遮雨, 两侧设置了人行台阶和有机玻璃挡板隔离。至今运行良好。

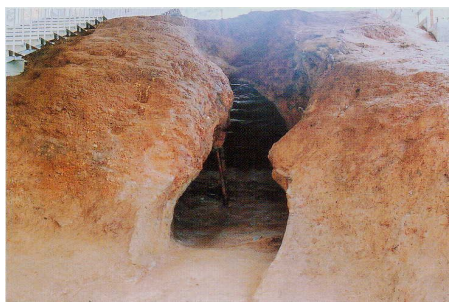


图 12 加固补强后 2 号古窑表面照片

Fig.12 Inside view of the Dougaeri No.2 kiln after reinforcement

值得一提的是加固补强施工刚完成后不久,当地发生了烈度为 5 级的地震(2005 年 3 月),古窑未出现任何破坏痕迹,Cave 型断面处也未发现张拉裂缝发展的迹象,表明微型土钉加固补强该受拉破坏裂缝的方案是合理的。

5 结 论

针对日本九州船迫 2 号土质古窑开挖内部回填土时出现的受拉破坏裂缝,本文简要介绍了受拉破坏的原因和机制,采用数值模拟分析的方法,提出了微型土钉加固补强该受拉裂缝的设计方案,结论如下:

(1) 数值模拟分析指出的 2 号古窑薄弱断面和破坏模式在现场工作中意外地得到验证,说明模拟分析中模型和参数的选定、模拟方法是合理的。为进一步通过数值模拟方法,确定土钉技术补强该张拉破坏裂缝提供了可靠的基础。

(2) 采用数值模拟的方法,评价了土钉长度、角度、间距和孔径对补强受拉裂缝的效果,推荐了补强设计方案。特别是考虑到现场施工空间的限制和外观要求,模拟分析了负倾斜角设置土钉的效果。分析结果表明,给定的条件下负倾斜角设置土钉比正倾斜角更有利于补强该 Cave 型断面的受拉破坏裂缝。

(3) 微型土钉技术加固补强 2 号土窑受拉裂缝的成功实施,为土钉技术加固保存土遗址提供了典型工程案例,具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 黄克忠. 任重而道远的莫高窟文化遗产保护[J]. 敦煌研究, 2006, (6): 200—202.
HUANG Ke-zhong. Protection of Mogaoku ashes with shouldering heavy responsibilities[J]. *Dunhuang Research*, 2006, (6): 200—202.
- [2] 黄克忠. 走向二十一世纪的中国文物科技保护[J]. 敦

煌研究, 2000, (1): 5—9.

HUANG Ke-zhong. Technological protection of Chinese cultural relics tending towards 21st century[J]. *Dunhuang Research*, 2000, (1): 5—9.

- [3] 黄克忠. 文物建筑材质的研究与保存[J]. 东南文化, 2003, (9): 93—96.
HUANG Ke-zhong. Research and protection on materials for cultural relics and architecture[J]. *Southeast Culture*, 2003, (9): 93—96.
- [4] 何燕, 李智毅. 关于河南灵泉寺石窟地质病害及整治方法的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 56—59.
HE Yan, LI Zhi-yi. A study of geological disease analyses and renovation methods in Lingquan Temple Grotto of Henan[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(1): 56—59.
- [5] 李丽慧, 杨志法, 岳中琦, 等. 龙游大型古洞室群变形破坏方式及加固方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2018—2028.
LI Li-hui, YANG Zhi-fa, YUE Zhong-qi, et al. Deformation and failure modes and reinforcement methods of ancient cavern group in Longyou County[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(12): 2018—2028.
- [6] 孙满利, 王旭东, 李最雄, 等. 交河故城瞭望台保护加固技术[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 163—168.
SUN Man-li, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong, et al. Technology of protection and reinforcement for observation platform in Ruins of Jiaohe[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 163—168.
- [7] 孙满丽, 王旭东, 李最雄, 等. 木质锚杆加固生土遗址研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2156—2159.
SUN Man-li, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong, et al. Study of immature earthen sites reinforced with wood anchor[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(12): 2156—2159.
- [8] 周双林, 王雪莹, 胡原, 等. 辽宁牛河梁红山文化遗址土体加固保护材料的筛选[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 567—570.
ZHOU Shuang-lin, WANG Xue-ying, HU Yuan, et al. Selection of strengthening medium for archaeological site of Hongshan Culture at Niuheliang, Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(5): 567—570.
- [9] 福冈县筑城町教育委员会. 船迫窑迹群调查报告[R]. 日本, 北九州市: 筑城町教育委员会, 1998.
- [10] CHAI Xin-jun. Development of earth sewing technique and its application for reinforcing funasako historical kiln site[Ph.D Thesis, D]. Saga, Japan: Saga University, 2005.
- [11] 柴新军, 柴新建, 林重德. 强度折减法分析边坡稳定性实例[J]. 路基工程, 2008, (3): 33—34.
CHAI Xin-jun, CHAI Xin-jian, LIN Chong-de. Analysis of slope stability by shear strength reduction method[J]. *Subgrade Engineering*, 2008, (3): 33—34.