

山地填方高边坡数值分析优化设计

周海鹰¹, 朱建峰², 周钰倪², 罗艺², 张文正¹, 余超¹

¹中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆

²重庆科技学院建筑工程学院, 重庆

Email: 410859780@qq.com

收稿日期: 2020年11月26日; 录用日期: 2020年12月11日; 发布日期: 2020年12月18日

摘要

高填方边坡在山地工程建设中占据较大的比例, 支护方式对于高填方边坡变形和稳定性控制极为重要。数值分析是边坡支护方案优化的有效方式, 本文采用Midas GTS/NX有限元软件, 对重庆某填方边坡的支护方向进行数值分析。研究表明: 对于超高填土边坡采用悬臂式桩板挡墙不能控制边坡位移, 在此基础上增加预应力锚索能有效地降低边坡位移, 但稳定性系数不满足要求。最后, 采用桩板墙 + 预应力锚索 + 坡脚注浆的方式不仅能有效控制边坡位移, 而且还显著提高边坡稳定性。该研究结果对于山地填方边坡的变形控制和稳定性分析具有较大的参考意义。

关键词

高边坡, 数值分析, 优化设计

Numerical Analysis and Optimal Design of High Slope Filled in Mountain Area

Haiying Zhou¹, Jianfeng Zhu², Yuni Zhou², Yi Luo², Wenzheng Zhang¹, Chao Yu¹

¹CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing

²School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Email: 410859780@qq.com

Received: Nov. 26th, 2020; accepted: Dec. 11th, 2020; published: Dec. 18th, 2020

Abstract

The high fill slope occupies a large proportion in the mountain engineering construction, and the supporting method is very important for the deformation and stability control of the high fill slope. Numerical analysis is an effective way to optimize the slope support scheme. In this paper,

Midas GTS/NX finite element software is used to conduct numerical analysis on the supporting direction of a filling slope in Chongqing rail transit. The results show that the cantilever pile plate retaining wall cannot control the slope displacement, and the pre-stressed anchor cable can effectively reduce the slope displacement, but the stability coefficient does not meet the requirements. Finally, the method of pile wall, pre-stressed anchor cable and grouting at the foot of slope can not only effectively control the slope displacement, but also significantly improve the stability of the slope. The results of this study have great reference significance for deformation control and stability analysis of mountain slope.

Keywords

High Slope, Numerical Analysis, Optimization Design

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

重庆是典型的山地城市，复杂的地质条件和有限的空间给城市基础设施建设带了严峻的挑战。例如，建设场地位于沟谷，需要对场地进行半填半挖，经常遇见 30~50 米高填方地区，若支护不当将导致建筑场地不稳定，进而引发安全事故，造成巨大的经济损失和人员伤亡。目前，国内外学者在填方边坡稳定性[1] [2]、填方支护方法[3]等方面开展了较为全面的研究，探讨了边坡的可靠度及敏感性，同时对边坡的稳定性开展数值分析[4]，但这些研究主要集中在岩质边坡和挖方边坡上，对于重庆地区超高填土边坡支护设计优化鲜有报道[5] [6] [7] [8] [9]，为此，本文以重庆某超高填土边坡为研究背景，建立有限元模型，对不同支护结构进行优化设计，为山城类似超高边坡的安全设计提供借鉴。

2. 工程概况

2.1. 场地及设计概况

重庆某建筑场地呈狭长型，东西宽约 310 m，南北长约 1350 m，场地场平处于半填半挖状态，其中 1-1 剖面由填方边坡形成，填方厚度为约 47.5 m。初步设计采用桩板式挡土墙，桩尺寸为 1.6 m × 2.4 m，间距 3.5 m，具体设计参数见图 1。

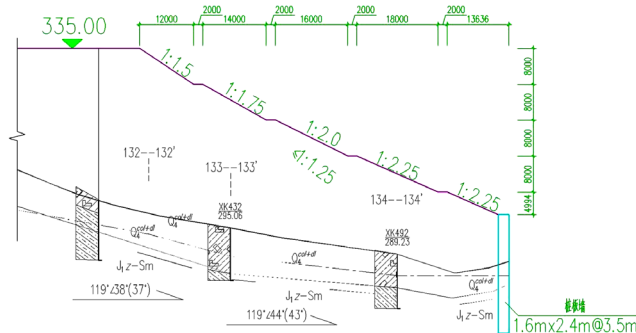


Figure 1. Preliminary design drawing (section 1-1)

图 1. 初步设计图(1-1 剖面)

2.2. 地层岩性

根据环境边坡详勘报告, 场地内多数地段基岩被第四系土层覆盖, 基岩露头零星出露。场地地层由上至下分别为第四系全新统残坡积层粉质粘土(Q_4^{el+dl}), 紫褐色, 软塑 - 可塑状, 土层厚度 3.00 m~5.80 m; 下伏基岩为侏罗系下统珍珠冲组($J_1 z$)岩层, 基岩以强风化和中风化砂质泥岩为主, 其中强风化砂质泥岩厚度 2~4 m, 岩土体材料参数见表 1。

2.3. 风险源辨识

经分析, 该超高填土边坡安全等级为一级, 桩顶距场地地面约 10.5 m, 桩顶距坡顶约为 37 m。填土压力、土岩结合面的下滑力, 使得桩身弯矩非常大, 将导致桩身位移过大, 因此, 本项目潜在的风险源在于桩身过大的位移, 易导致桩身断裂从而发生强度破坏。同时高填方边坡自身发生失稳破坏, 导致边坡垮塌事故。

3. 边坡设计数值分析

本次设计采用 MIDAS/GTS NX 进行边坡二维平面分析。该软件是一款专门对岩土工程领域分析与设计而开发的有限元软件, 广泛地应用于基坑、边坡、矿山等工程的建模和分析, 具有较强的非线性计算能力。

3.1. 模型及参数

本次建模充分利用了原设计的 AUTO CAD 中 2D 模型, 将其倒入 Midas GTS/NX 中。同时, 为了减小边界效应的影响, 取模型边界到填方施工区为 5 倍桩身长度, 因此, 最终模型尺寸为: 160 m × 85 m。采用 4 边形单元对模型进行网格划分见图 2, 并在边坡表面进行适当加密, 得到 4925 个单元。

Table 1. Rock and soil material parameters

表 1. 岩土体材料参数

岩土体	重度 (kN/m^3)	内聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ ($^\circ$)	弹性模量 (MPa)	泊松比 μ
残积土	18.0	20	26	40	0.4
全风化砂岩	22.3	80	36	150	0.33
中等风化砂岩	25.5	450	38	387	0.25
边坡回填土	18.8	25	29	80	0.34
桩(按砼 C30)	25.5	/	/	30,000	0.20
锚索	29.9	/	/	280,000	0.15
注浆体	19	36	32	100	0.34

计算模型中本构模型采用摩尔 - 库伦模型, 桩板墙采用梁单元模拟, 预应力锚索采用植入式桁架模拟, 具体参数见表 1。计算过程中, 对模型的 XY 方向施加边界约束。

3.2. 不同设计方案分析

该边坡在设计时, 根据详勘报告, 考虑了土压力, 采用悬臂式桩板挡墙。施工过程中桩顶监测位移过大, 根据施工勘察, 补充提供了土岩结合面的参数, 本处土压力由土岩下滑力控制, 又进行了桩板墙+预应力锚索及桩板墙+预应力锚索+坡脚注浆的方案比选进行加固 3 种设计方案如下:

方案一: 悬臂式桩板挡墙;

方案二: 桩板墙 + 预应力锚索;

方案三：桩板墙 + 预应力锚索 + 坡脚注浆。具体施工模拟过程中，先施工桩板墙，继续坡脚注浆(若有)，再施工预应力锚索，最后按照分层填筑分层夯实。针对以上三种方案，选取分层填筑以后的计算结果进行讨论：

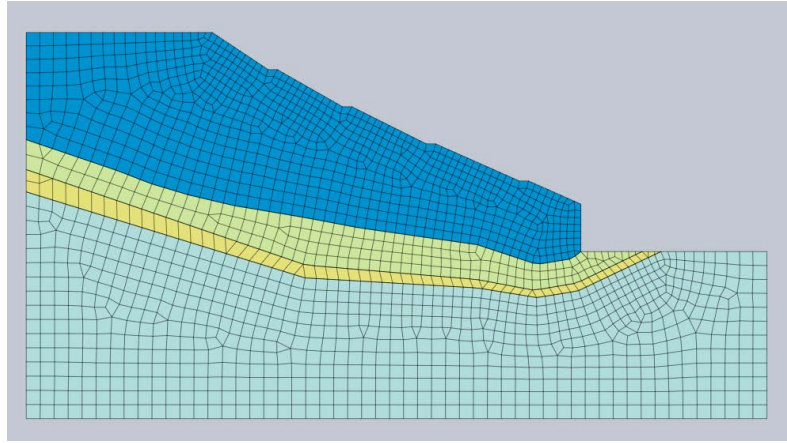


Figure 2. Divide the grid
图 2. 网格划分

1) 悬臂式桩板挡墙

悬臂式桩板挡墙是由悬臂桩和挡土板组成，因造价较为经济，在重庆边坡广泛应用。在此次分析中作为比选方案，对其支护效果进行数值分析。从图 3 可以看出，该方案支护后边坡最大总体位移为 13.76 cm，最大剪切应变贯穿填土层。同时经该软件的强度折减法计算出边坡的稳定性系数仅为 0.95，处于不稳定状态，因此，该支护方案存在边坡位移过大、边坡失稳的危险，需要增强支护强度。

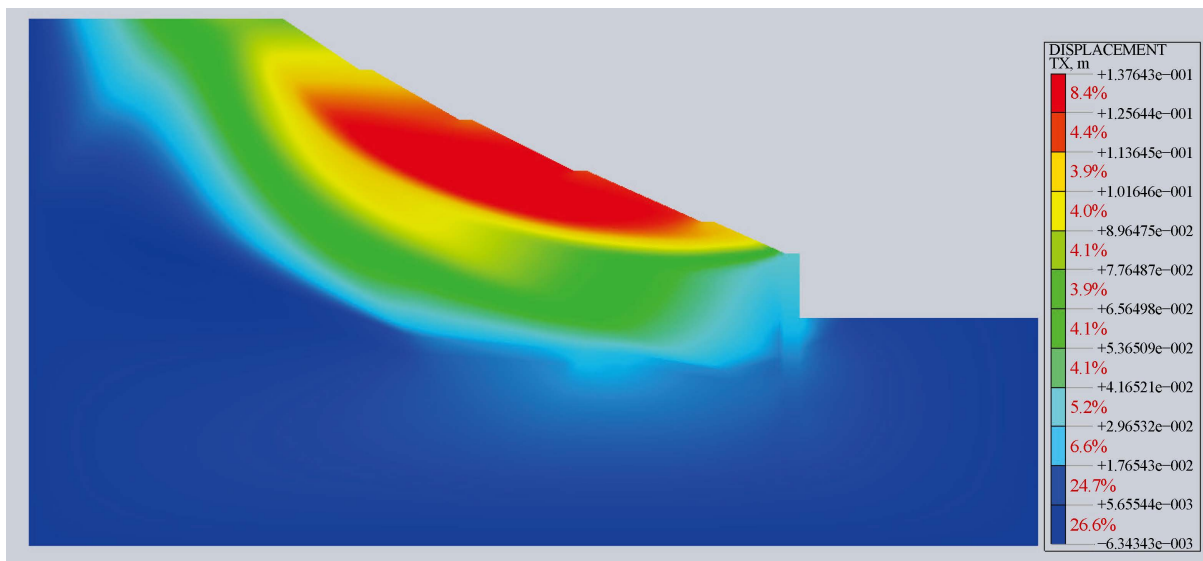
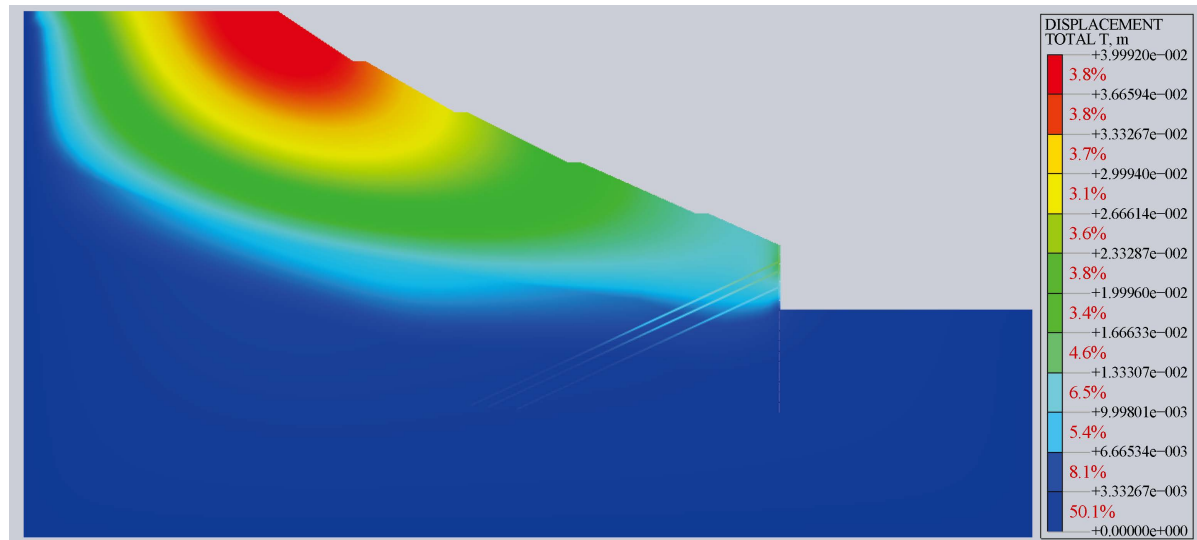


Figure 3. Simulation results of cantilever pile-slab retaining wall
图 3. 悬臂式桩板挡墙模拟结果

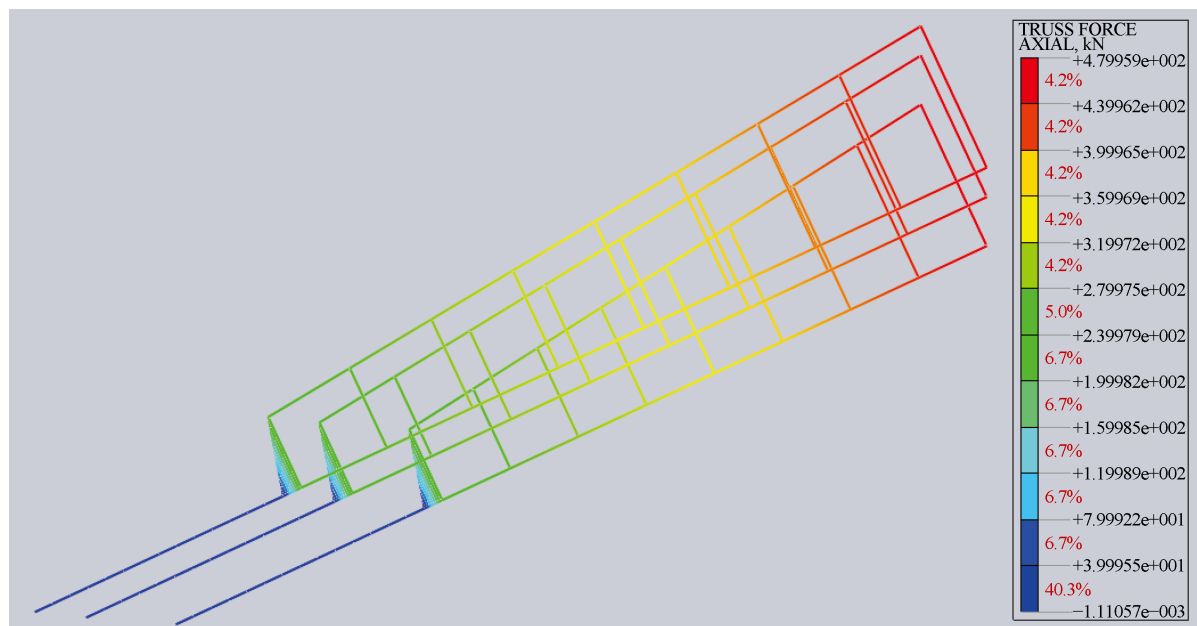
2) 桩板墙 + 预应力锚索

预应力锚索作为受拉构件可以有效地协助抵抗土压力和控制桩身变形，因此预应力锚索在超高边坡

支护中被广泛采用。本项目将该方案作为优选方案，对其进行了数值分析。其中，桩体混凝土为 C30，桩宽 1.6 m，高 2.4 m，桩总长 26.5 m，桩间距 3.5 m。预应力采用高强度低松弛的钢绞线，单根锚索抗拉设计值均为 500 kN，锚固段长度不小于 12 m。



(a) 边坡总体位移图(桩锚)



(b) 锚索轴力图(桩锚)

Figure 4. Pile anchor simulation results**图 4.** 桩锚模拟结果

从图 4 可知：该方案支护后边坡的最大水平位移为 3.9 cm，变形集中在坡顶附近。另外，坡体内出现较小的塑性贯通区，有滑动的趋势。锚索自由段最大拉力为 479 kN，锚索轴力在设计值之内。经过强度折减法计算的边坡稳定系数为 1.263，该值小于一级边坡的安全系数 1.35，处于基本稳定状态。但从稳定性角度来看，应继续加大支护强度，使一级边坡稳定系数大于 1.35。

3) 桩板墙 + 预应力锚索 + 坡脚注浆

虽然上一支护方案的变形明显减小, 但是其稳定性略小于 1.35。为此, 在该方案的基础上提出在边坡坡脚靠近抗滑桩顶附近进行注浆, 注浆宽度从桩顶向左 20 m, 深度为 10 m。注浆液为灰水比为 0.45~0.5 的 M35 素水泥浆。

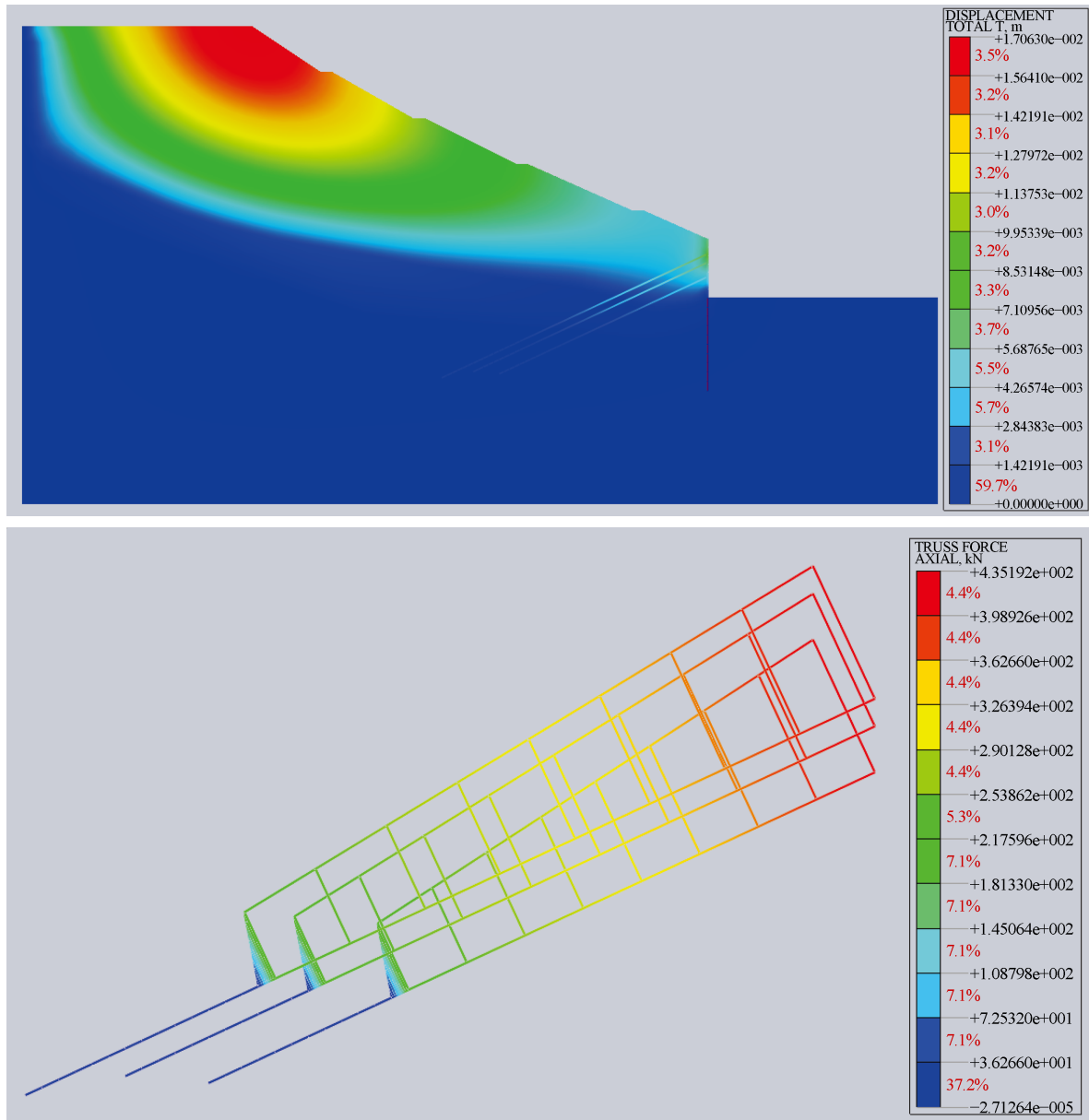


Figure 5. Pile anchor + grouting simulation results

图 5. 桩锚 + 注浆模拟结果

由图 5 可知: 注浆有效地控制了边坡的总体位移, 最大位移减小到 1.71 cm。剪切变形区的范围也较未注浆时明显减小, 剪切变形区并未贯通。同时, 经过强度折减法计算得到的边坡稳定系数为 1.371, 大于 1.35, 边坡处于稳定状态。因此, 桩锚+注浆不仅有效地控制了边坡变形, 还提高其稳定性, 是本次设计的最优方案。

4. 结论

基于强度折减法采用 MIDAS/GTS NX 对重庆某超高填方边坡进行数值分析, 得出如下结论:

1) 悬臂式桩板挡墙对于超高填土边坡的适应性差, 变形大。预应力锚索设计能有效协助抗滑桩进行边坡位移控制, 减小边坡变形, 但边坡稳定性系数小于一级边坡的安全系数。

2) 为进一步控制边坡变形并提高稳定性系数, 对方案进行优化, 采用桩板墙 + 预应力锚索 + 坡脚, 将边坡最大位移控制在 1.71 cm, 稳定性系数提高到 1.371, 满足规范大于 1.35 的要求。因此, 该方案是本次高填方边坡设计的最优方案。

基金项目

重庆市建设科技计划项目(暴雨工况下山地高边坡稳定性分析与控制研究)。

参考文献

- [1] 朱彦鹏, 魏真红, 杨校辉, 等. 预应力锚索桩板墙支护多级高填方边坡监测研究与分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(7): 202-207.
- [2] 曾臻, 冯胜. 某高填方边坡稳定性分析与支护方案评价研究[J]. 路基工程, 2020(3): 209-213.
- [3] 李晓宁, 陈位洪, 申琦瑜. 某加筋土高填方边坡设计[J]. 特种结构, 2020, 37(2): 51-55.
- [4] 付文光, 卓志飞. 某山地建筑项目岩土工程设计[J]. 广州建筑, 2015, 43(2): 16-20.
- [5] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1714-1723.
- [6] 郭利娜, 胡斌, 胡启晨. 基于 Geo-Slope 软件对青莲寺边坡的稳定性分析[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(6): 20-24.
- [7] 雷德鑫, 易武, 柳青, 等. 三峡库区卧沙溪滑坡稳定性的可靠度及敏感性分析[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(1): 23-28.
- [8] 马恩帅, 程建军, 刘毅. 基于 Quake/W 和 Slope/W 耦合方法的地震作用下水库边坡稳定性分析——以小锡伯提水库为例[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2015, 33(2): 244-251.
- [9] 吴平, 付红渊. 基于 FLAC3D 的斜坡治理稳定性数值分析[J]. 公路与汽运, 2012(2): 133-135.