

考虑边坡不同演化阶段的岩土体 抗剪强度参数反分析

龙赛琼¹, 陈焕美¹, 蒋文鹏^{2,3}, 梁栋才^{4,5}, 尹小涛⁴

(1. 云南省交通发展投资有限责任公司, 云南 昆明 650034;

2. 云南大永高速公路有限公司, 云南 大理 671000;

3. 云南省交通投资建设集团有限公司, 云南 昆明 650200;

4. 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试验室, 湖北 武汉 430071;

5. 中国科学院大学, 北京 100000)

摘要: 岩土体抗剪强度参数是边坡稳定性分析的关键参数。目前, 大多数岩土体抗剪强度反分析法都只围绕着边坡工程的某一阶段进行分析。为了更加贴合实际边坡发育的动态变化, 提出一种新方法。考虑边坡不同演化阶段的岩土体抗剪强度参数反分析是一种基于极限平衡方法, 对自然坡、开挖边坡、失稳边坡这三个过程进行了全工程周期反分析, 结合边坡稳定性分析的前提条件, 并通过对两个工程实例的分析得到了岩土体抗剪强度在不同阶段的衰减规律。利用极限平衡软件进行计算验证了方法的有效性, 符合实际情况, 同时工程开挖会对边坡稳定性参数造成严重的不利影响。

关键词: 极限平衡; 全工程周期; 反分析; 前提条件

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)01—0016—06

Inverse Analysis Method for Rock/soil Shear Strength in Different Slope Stages

LONG Saiqiong¹, CHEN Huanmei¹, JIANG Wenpeng^{2,3}, LIANG Dongcai^{4,5}, YIN Xiaotao⁴

(1. Yunnan Communications Investment & Development Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650034, China;

2. Yunnan Dayong Highway Limited Company, Dali, Yunnan 671000, China;

3. Yunnan Communications Investment & Construction Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China;

4. State Key Laboratory of Geo-mechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and

Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: Shear strength parameters of rock and soil mass are the key issues of slope stability analysis. At present, most inverse analysis method of rock and soil mass focus on one stage of slope engineering. In order to fit the actual slope, a new method is proposed in this paper. Inverse analysis method for rock/soil shear strength in different slope stages is a method based on limit equilibrium. The three process, natural slope, slope excavation and instability of the slope are analyzed in the whole project cycle. Through the analysis of two engineering examples, the shear strength in the different stages of the attenuation law was determined. This method is verified by using limit balance software. It is also found that engineering excavation will have serious adverse effects on slope stability parameters.

Keywords: limit equilibrium; full engineering cycle; inverse analysis; preconditions

边坡与滑坡工程抗剪强度参数直接影响到岩土体的承载特性, 对工程建设有着重要意义。目前, 获

收稿日期: 2019-10-18

修稿日期: 2019-11-14

基金项目: 云南省交通运输厅项目(云交科教[2017]23号); 交通运输部科技示范项目(2017-09)

作者简介: 龙赛琼(1975—), 女, 云南宣威人, 高级工程师, 主要从事项目管理工作。E-mail: 676735427@qq.com

通讯作者: 尹小涛(1975—), 男, 陕西咸阳人, 博士, 副研究员, 主要从事工程防灾减灾研究工作。E-mail: yxt9406@163.com

取岩土抗剪强度参数的方法有试验法、经验法和反演法。室内试验和经验法都在一定程度上不能完全符合边坡工程的实际状况。反演法是一种用来确定边坡与滑坡工程抗剪强度参数的有效手段^[1]。它在已知稳定性系数及滑面等条件下,反算滑面的岩土抗剪强度参数。它采用的是以边坡稳定性状态倒推岩土体力学参数的逻辑,目前相关研究已有可观成果^[2]。张新敏等^[3]利用广义楔形法及程序 GWEDGEM 对滑带 c 和 φ 值进行敏感性分析。孙超伟等^[4]基于场变量的有限元强度折减法,借助 ABAQUS 软件,建立了一套求解三维均质边坡反分析模型。唐红波等^[5]利用 bishop 极限平衡理论对自然破进行了稳定性分析。卢坤林等^[6]以滑面正应力修正三维边坡稳定性分析方法为基础,建立了确定滑带土抗剪强度参数的三维反分析模型。谭万鹏等^[7]采用位移反分析方法反演了边坡岩土体强度参数。汤罗圣等^[8]将数值模拟与位移监测结合起来,并用此方法成功反演了三峡库区某滑坡抗剪强度参数。丁德馨等^[9]运用神经网络,首次提出并建立了圆弧滑动智能化算法。罗莉等^[10]也采用遗传算法反演得到了滑坡岩土体的抗剪强度参数,提出了将强度折减与位移优化反分析结合起来反演简单边坡体抗剪强度参数的方法。朱友谊^[11]以点稳定性系数理论为基础,采用软件 FLAC^{3D} 参数反演得出符合滑坡实际现状的滑带土强度参数。柳旻等^[12]通过实时检测,揭示了工程开挖对通过影响表面裂缝的大小,进一步造成稳定性的下降。

研究表明,施工扰动会加剧卸荷变形和坡体软化变形,岩体软化后的变形模量下降约 80%。开挖前的 5.56 的稳定性系数,在施工扰动与地下水共同作用下下降至 1.96,开挖后从 2.77 降至 1.07^[13]。边坡开挖扰动,改变了原自然坡的地表状态,可能使潜在不利软弱层面临空,导致开挖边坡稳定性下降;开挖后使坡体变陡,产生卸荷变形,坡表一定范围岩体刚度下降,坡体产生随节理裂隙扩张,结合雨水的侵入作用^[14],导致坡体的强度逐渐下降。以往的学者大多是针对边坡或滑坡的某一阶段进行研究的,忽略了岩体抗剪强度参数的演化过程,这常常导致边坡发生设计满足规范要求,但实际上却在开挖过程中或开挖后出现失稳的情况。

考虑边坡不同演化阶段的岩土体抗剪强度参数反分析方法是一种考虑施工扰动的动态分析方法,可获得边坡不同发展阶段下的岩土体抗剪强度参数,得出比试验数据和工程经验更符合实际情况的

岩土体抗剪强度参数衰减规律,为边坡主动加固设计提供依据,有效指导边坡设计工作。

1 岩土抗剪强度参数反分析的前提

根据反分析计算的特点,总结出如下三类信息。此三类信息是反分析计算的前提,信息越准确,反分析得到的结果越接近真实情况。

(1) 坡体的稳定系数值。反分析中,滑坡稳定系数取值与滑坡发育阶段有关。根据滑坡变形情况,文献[15-18]已经对滑坡在不同发育阶段的稳定性系数推荐值做过深入的研究,可以参照表 1 进行选取。本文参照此表取值。

表 1 滑坡不同发育阶段稳定评估系数表

发育阶段	变形性质	稳定系数 F_s	变形性质
局部 变形	蠕动	1.05 ~ 1.10	表现为深部位移或建筑物变形
	蠕动挤压	1.01 ~ 1.05	滑坡后部可见地表裂缝,前缘变形微弱
整体 变形	微动或主滑段处于等速滑动	1.00	局部坡面变形异常,陡坎处出现小局部滑塌
	主滑段处于加速滑动	0.95 ~ 1.00	破面出现鼓丘及挤压变形

(2) 滑面的确切位置,包括后缘拉裂缝及前缘剪出口。滑带依据钻孔资料或现场调查确定。反分析的计算剖面根据地质勘察资料确定,剖面应为主滑方向。

(3) 滑坡剧滑或变形时的工况。必须查清剧滑动前的雨情、震情、水位升降、斜坡弃土等生成剧滑破坏的外力因素。当坡体处于强变形或挤压变形阶段,尚没有发生滑动,同样需要查清造成坡体变形的各种外力因素。

2 考虑边坡不同演化阶段的岩土体抗剪强度参数反分析方法

提出一种基于边坡演化阶段的岩土体抗剪强度参数反分析方法,这种方法主要基于室内试验结果、工程经验、地质勘察资料和岩土体抗剪强度的反演分析来实现的,其具体方法如下:首先,对处于某一阶段或某几个阶段的边坡(如原始边坡、开挖边坡、失稳后边坡)进行现场取样进行室内试验,再结合地区经验数据得到岩体强度参数;其次,根据地质勘察资料建立包括坡形、地层分布和滑动面在内的计算模型;最后,通过不同阶段边坡稳定状态计算出处

于不同发展阶段边坡的岩土体抗剪强度参数,并将之与室内试验对比分析,得到符合不同阶段工程实际情况的岩土体抗剪强度参数。

2.1 开挖边坡的岩土体抗剪强度参数反分析

开挖边坡处于失稳状态(或滑坡状态),稳定系数 F_s 值比较容易确定。该阶段的稳定系数 $F_s = 0.95 \sim 1.00$,列出极限平衡方程来反算岩土抗剪强度参数。因为岩体的 c 值受风化影响较大,可先设定 φ 进行反分析试算。一般说来根据反分析得到的滑带 c 、 φ 值是一组区间值,可结合试验值进行确定。

极限平衡法的边坡稳定性系数公式如下:

$$F_s = f(c', \varphi', u, N, W, D, \alpha, \beta_i) \quad (1)$$

式中: c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; u 为孔隙水压力; N 为土条底部法向力; W 为土条自重; D 为集中点荷载; α 为土条底部倾角; β_i 为各种几何参数。

2.2 失稳后边坡的岩土体抗剪强度参数反分析

失稳后边坡距今时间最短,能够进行较为准确的室内试验和现场勘查。边坡失稳后,岩土体通过变形调整到一个相对稳定的状态,所以岩体强度较开挖边坡的岩体强度是有所降低的。根据现场勘查报告确定坡体是否有蠕滑变形($F_s = 1.0$)或完全稳定状态($F_s = 1.01 \sim 1.05$)。

2.3 自然边坡的岩土体抗剪强度反分析

自然边坡状态距今时间长,稳定系数 F_s 的确定需要涉及到滑坡范围之外的岩体,所以要在数据详实的情况下进行反分析。应在开挖边坡反分析得到的岩体抗剪强度参数基础上进行调整,参考滑坡范围之外岩体试验结果和工程类比结果,确定自然边坡的岩土体抗剪强度。这个强度值是工程施工扰动之前的初始强度,获得这个强度参数对于边坡设计中加固时机的选择是十分有益的。

室内试验和反演分析求得的岩土体抗剪强度参数对应边坡的三个不同阶段,如图 1 所示。

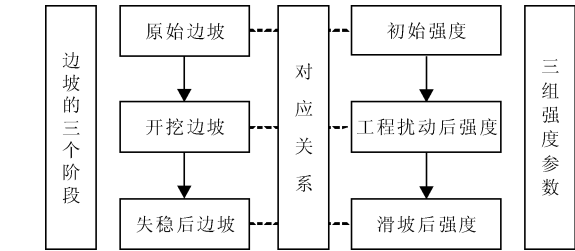


图 1 边坡不同阶段的抗剪强度参数

3 全强风化岩体抗剪强度反分析实例

以云南某高速公路的 2 个工程开挖后失稳的边坡为例,建立两组反分析模型,对不同阶段的边坡岩体抗剪强度进行了反分析。

边坡所处工程区域湿热多雨,岩体风化作用强烈、风化深度大。边坡 1 地表为第四系残积层粉质黏土,下伏第三系砂砾岩和白垩系下统砂岩、泥质粉砂岩。边坡 2 出露的地层主要有第四系坡残积层粉质黏土、全一强风化褐红色粉砂质泥岩。

3.1 边坡 1 不同阶段岩体抗剪强度参数反分析

图 2 展示了边坡 1 的自然坡面、设计坡形及目前开挖后的边坡形态。根据现场工程地质调查结果以及工程经验确定不同阶段的边坡稳定状态反分析依据:原始坡面($F_s > 1.0$);开挖设计坡面($F_s < 1.0$);失稳后坡面($F_s \approx 1.05$)。开挖边坡计算模型见图 3。计算中取滑体重度为 20 kN/m^3 。

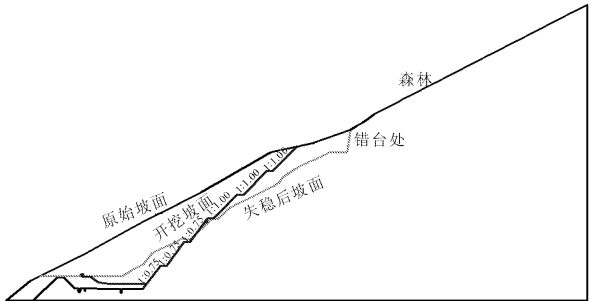


图 2 不同阶段的边坡形态

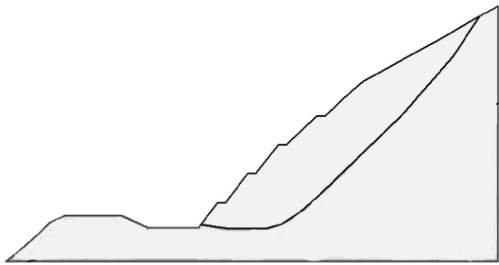


图 3 开挖后边坡计算模型

滑带岩体主要为碎石土状,室外钻探取样难以取到,室内试验结果偏高。滑带黏聚力 $c = 10 \text{ kPa} \sim 30 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 17^\circ \sim 26^\circ$ 。将不同的参数组合带入分析模型中计算,得到的反分析结果如下:当 $c = 25 \text{ kPa}$, $\varphi = 23^\circ$ 时,开挖后坡形下边坡稳定性稳定性系数为 0.985,符合边坡开挖过程中失稳的状态。

由于无法准确确定自然边坡的稳定性系数,利

用开挖边坡模型对自然边坡的岩体抗剪强度参数进行反分析。在将开挖边坡模型向后延伸,在实际滑面之后 30 m 设置另外一个滑面,采用开挖后的岩体抗剪强度参数计算得到该滑面的稳定性系数为 0.945,小于实际滑面的稳定性系数 0.985,实际情况是坡体沿实际滑面发生滑动,而后缘滑面基本上保持稳定。因此初始地形条件下岩体抗剪强度参数应略大,取 $c = 33\text{ kPa}$, $\varphi = 24^\circ$ 时,开挖后边坡后缘滑面稳定性系数达到 1.040,如图 4 所示,这可看作自然边坡的初始抗剪强度参数。

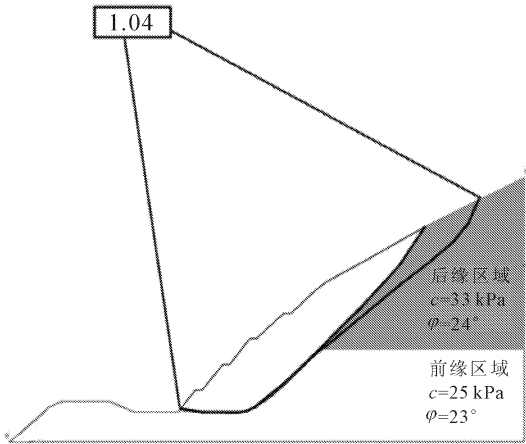


图 4 自然边坡岩体初始抗剪强度反分析模型

边坡开挖造成施工扰动,导致阻滑段抗滑能力降低,边坡失稳。为确定边坡失稳后滑带的抗剪强度参数,建立失稳后边坡计算模型如图 5 所示。由于边坡失稳后坡体仍处于蠕滑状态,其稳定性系数为 1.05 左右。当最危险滑面稳定性系数为 1.054 时,得到滑带抗剪强度为 $c = 10\text{ kPa}$, $\varphi = 21^\circ$,这表明边坡失稳后滑带的抗剪强度进一步下降,边坡补救方案不得不面对这一较低的抗剪强度参数。

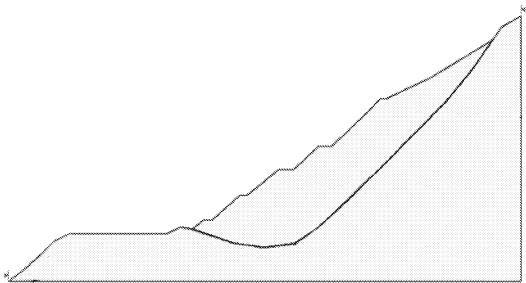


图 5 失稳后边坡计算模型

3.2 边坡 2 不同阶段岩体抗剪强度参数反分析

图 6 展示了边坡 2 的自然坡面及开挖后的边坡形态。根据现场工程地质调查结果以及工程经验确定边坡不同阶段的稳定状态反分析依据:K100 +

252 边坡剖面存在三种形状态,原始坡面 ($F_s > 1.0$),初次开挖坡面 ($F_s < 1.0$) 和二次开挖坡面 ($F_s = 0.95$)。计算中取滑体重度为 22 kN/m^3 。

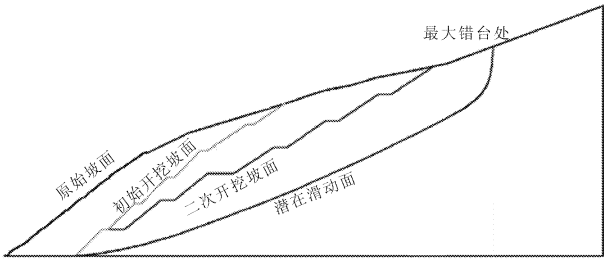


图 6 开挖后边坡计算模型

首先对初次开挖阶段的边坡岩体抗剪强度参数进行反分析,根据滑坡后的补充勘察结果,初次开挖状态下的滑带抗剪强度参数为 $c = 20\text{ kPa}$, $\varphi = 19.8^\circ$ 。初始开挖后边坡的稳定性系数 $F_s = 0.99$,这和初次开挖后边坡失稳相符合。

滑坡发生后进行二次开挖。二次开挖完毕,边坡仍出现了整体变形,说明滑带抗剪强度参数在降雨及工程扰动下发生弱化。当边坡的稳定性系数 $F_s = 0.95$ 时,反分析得到滑带的强度参数为 $c = 17\text{ kPa}$, $\varphi = 19^\circ$ 。

为获取自然边坡岩体抗剪强度参数,在实际滑面的后部假定 3 组滑面,如图 7 所示,分别计算其稳定性系数。采用开挖后滑带的抗剪强度参数 $c = 20\text{ kPa}$, $\varphi = 19.8^\circ$,发现滑面 2 的稳定性系数 $F_s = 0.98$ (< 0.99),这与边坡沿实际滑面发生滑动相矛盾,因此岩体初始抗剪强度参数应略大。当滑面 2 的稳定性系数达到 1.006 时,得到岩体初始抗剪强度参数为: $c = 30\text{ kPa}$, $\varphi = 25^\circ$,如图 8 所示。

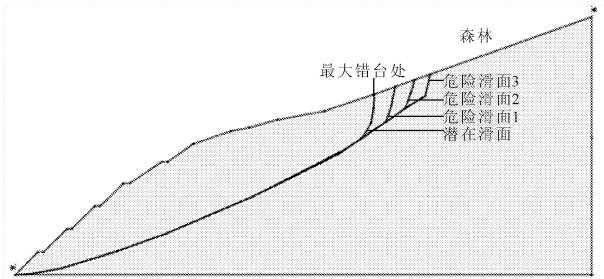


图 7 滑坡后缘危险滑面的搜索

3.3 岩体抗剪强度的演化过程

岩体抗剪强度演化过程见图 9。岩体抗剪强度从自然边坡的初始强度,逐渐过渡到工程扰动后的岩体强度,滑坡发生后岩体经过变形错动,其强度进一步降低。

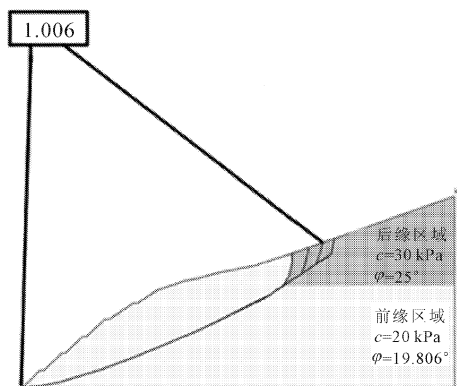


图 8 后缘强度系数调整后的开挖边坡计算模型

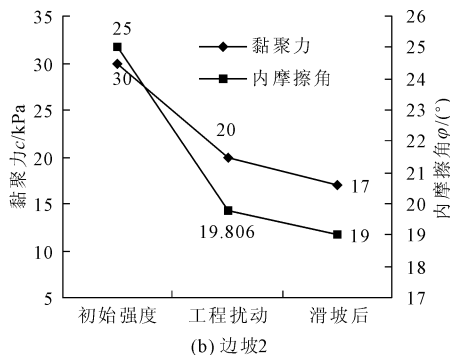
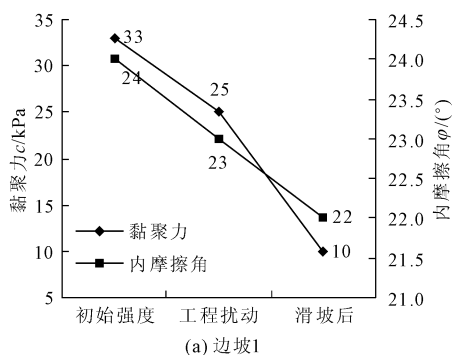


图 9 岩体抗剪强度的演化过程

从岩体抗剪强度演化曲线可以看出,岩体在工程扰动后强度下降, c 下降幅度在 20.0% ~ 24.2%, ϕ 下降幅度在 4.2% ~ 33.0%,原因在于泥质粉砂岩和泥岩的粘粒和亲水矿物含量高,工程扰动后边坡临空变形导致裂隙扩张,在剪切变形过程中亲水矿物吸水膨胀使得结构变得松散,这导致按初始岩体强度设计能保持稳定的边坡在开挖后失稳,滑坡后岩体抗剪强度进一步下降,这是由于滑坡造成的相对错动导致滑带岩体含水量增大,表现出泥化效应,和初始强度相比,下降幅度分别达到 33.3% ~ 43.3% 和 24.0% ~ 58.3%。岩体的地质成因、颗粒成分、矿物成分是导致其抗剪强度在不同边坡阶段大幅下降的内因,外因则是工程扰动等不利作用。针对受工程扰动影响大的岩体,边坡设计和施工中必须抓住有利时机,采取“主动加固”设计理念:预先加固、及时加固,避免工程扰动后岩体抗剪强度大幅下降,以致边坡失稳,再采取补救措施的不利后果。

4 结 论

(1) 针对目前岩土体抗剪强度参数反分析方法中未考虑施工扰动和边坡全施工周期岩土体抗剪强度衰减的情况,提出了考虑边坡不同演化阶段的岩

滑坡后滑带岩土样本的室内试验结果如下,在不同含水率条件下,岩体的抗剪强度参数在 $c = 11 \text{ kPa} \sim 25 \text{ kPa}$, $\phi = 25^\circ \sim 32^\circ$ 。参考地区经验数据,此类碎石土状的强度参数一般在 $c = 9 \text{ kPa} \sim 12 \text{ kPa}$, $\phi = 23^\circ \sim 26^\circ$ 。反分析得到的滑坡后岩体强度参数和地区经验数据基本一致,但略低于室内试验结果;滑带岩体主要为碎石土状,无法取原状样,重塑样很难反映滑带岩体实际情况,室内试验结果偏高。为了实际施工安全考虑,边坡不同演化阶段的岩土体抗剪强度参数应主要参照反分析分析结果,演化过程见图 9。

土体抗剪强度参数反分析方法。

(2) 通过两个工程实例的计算结果与室内试验和地区经验数据的对比,得出本文提出的反分析方法符合实际情况:岩土体抗剪强度受施工扰动影响发生衰减,这导致按勘察阶段确定的岩土体抗剪强度进行设计的边坡在开挖后失稳,边坡失稳后岩土体抗剪强度进一步下降,这给边坡补救设计带来了极大困难。

(3) 基于边坡不同演化阶段的岩土体抗剪强度参数反分析结果,开挖扰动造成的岩土体抗剪强度衰减是不能忽略的,为更好利用岩土体初始抗剪强度,对开挖扰动后易造成岩土体抗剪强度大幅下降的泥质粉砂岩和泥岩,建议采取主动加固设计理念,以保证边坡安全并节约工程造价。

参考文献:

- [1] 易朋莹,王 凯,任 佳,等. 基于传递系数法的滑坡滑带土强度参数反分析研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2008,19(4):23-26,32.
- [2] 曾 铃,蒋中明,付宏渊. 边坡潜在滑动面抗剪强度参数反演研究[J]. 中外公路,2011,31(2):23-26.
- [3] 张新敏,蒋中明,刘建辉. 公路滑坡滑带 c 、 ϕ 值反分析方法[J]. 中外公路,2005(5):26-28.

[4] 孙超伟,柴军瑞,许增光,等. 求解三维均质边坡安全系数的稳定性图表法研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(11):2068-2077.

[5] 唐红波,段现花,吴 斌,等. 大箴居不稳定斜坡和沟谷弃土场联合整治实录[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):220-225.

[6] 卢坤林,朱大勇,许 强,等. 滑带土抗剪强度参数的三维反分析[J]. 岩土力学,2010,31(10):3319-3323,3328.

[7] 谭万鹏,郑颖人. 岩质边坡弹黏塑性计算参数位移反分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S1):2988-2993.

[8] 汤罗圣,殷坤龙,周 丽,等. 基于数值模拟与位移监测的滑坡抗剪强度参数反演分析研究[J]. 水文地质工程地质,2012,39(4):32-37.

[9] 丁德馨,张志军,王卫华. 圆弧滑动边坡智能化反演设计方法研究[J]. 南华大学学报(理工版),2002(4):1-4,17.

[10] 马金莲. 边坡与滑坡工程抗剪强度参数反演分析及其应用[D]. 兰州:兰州理工大学,2016.

[11] 朱友谊. 基于监测数据和参数反演的滑坡动态设计与施工[D]. 成都:西南交通大学,2015.

[12] 柳 旻,姚晨辉,张 超,等. 东南亚某水电站厂房边坡开挖变形特征及成因机制分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):133-137.

[13] 袁从华,吴振君. 坡积松散体稳定性模型试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(S1):121-126,154.

[14] 宋亚亚,何忠意,朱佩宁,等. 降雨入渗对非饱和土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(3):72-78.

[15] 徐邦栋. 我国铁路路基滑坡防治[J]. 土木工程学报,1982(2):77-84.

[16] 高德军,徐卫亚,郭其达. 长江三峡大石板滑坡计算参数反分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006(1):74-78.

[17] 祝 辉,唐红梅,叶四桥. 基于稳定现状的滑坡滑带土强度参数反分析[J]. 路基工程,2007(6):7-9.

[18] 易朋莹,王 凯,任 佳,等. 基于传递系数法的滑坡滑带土强度参数反分析研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2008,19(4):23-26,32.

(上接第 15 页)

[4] 郑 刚,龚晓南,谢永利. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(2):127-136.

[5] 宾 斌,蒋厚良,王雪龙,等. 导水布袋复合压密注浆桩技术在软土质堤防加固处理中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(4):183-187,219.

[6] 王良民. 滨海相城市道路软基综合加固措施与效果评价研究[D]. 长沙:中南大学,2011:15-22.

[7] 习志雄,杨贝贝. 真空预压吹填淤泥地基均匀性的离散元模拟[J]. 水利与工程建筑学报,2018,16(5):153-156.

[8] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京:中国建筑工业出版社,2007:902-955.

[9] 建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:14-47.

[10] 赵东远. 近海滩涂区域围海造田地基处理技术及沉降效果研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017:4-15.

[11] 周建华,王丽娟,张金接. 控制性灌浆帷幕对某枢纽地基防渗适用性研究[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会. 地基与基础工程技术创新与发展——第 14 次全国水利水电地基与基础工程学术研讨会论文集. 长沙,2017. 09,北京:中国水利水电出版社,2017:1-7.

[12] 赵卫全,黄立维,符 平,等. 灌浆技术在烟囱地基加固中的应用[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会. 中国水利学会地基与基础工程专业委员会第十一次全国学术技术研讨会论文集. 成都,2011. 11,北京:中国水利水电出版社,2011:105-112.

[13] 肖恩尚,欧阳幸,袁 梅. 控制性灌浆技术述评[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会. 2009 年地基基础工程与锚固注浆技术研讨会论文集. 长沙,2009. 11,北京:中国水利水电出版社,2009:1-5.

[14] 刘 峰,马 华,尹锡杰. 劈裂注浆在机场场道扩建工程中的应用[J]. 路基工程,2015(4):163-167.

[15] 刘文永. 注浆材料与施工工艺[M]. 北京:中国建材工业出版社,2008:65-70.

[16] 复合地基技术规范:GB/T 50783—2012[S]. 北京:中国计划出版社,2012:11-27.

[17] 建筑工程水泥 - 水玻璃双液注浆技术规程:JGJ/T 211—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:12-16.