

基于参数反分析的边坡加固设计研究

汪德兵¹, 王晓旭², 严俊峰²

¹重庆蜀通岩土工程有限公司, 重庆

²中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉

Email: 1185562299@qq.com

收稿日期: 2020年11月25日; 录用日期: 2020年12月18日; 发布日期: 2020年12月28日

摘要

采用反分析的方法确定已失稳边坡的现状参数具有效率高, 准确性好的优点。以某高速公路左侧一典型路堑边坡为例, 首先分析现状边坡的失稳破坏模式, 在此基础上确定反分析计算的目标稳定性系数和工况。然后通过极限平衡参数反分析获取边坡岩土体现状强度参数值。最终计算满足各工况要求的最大边坡加固力, 给出边坡加固方案, 并采用有限元进行了验证。得到如下结论: 1) 经过反分析计算, 得到边坡岩土体饱和参数为内摩擦角 φ 等于 13° , 粘聚力 c 为15 kPa; 2) 在降雨 + 自重条件下边坡所需加固力最大。边坡加固采用减缓坡比以及边坡中部布置钢筋混凝土抗滑桩的方式, 并且在边界外设置截排水沟。

关键词

路堑边坡, 反分析, 强度参数, 加固方案, 有限元

Research on Slope Reinforcement Design Based on Parameter Back Analysis

Debing Wang¹, Xiaoxu Wang², Junfeng Yan²

¹Chongqing Shutong Geotechnical Engineering Co., Ltd., Chongqing

²CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan Hubei

Email: 1185562299@qq.com

Received: Nov. 25th, 2020; accepted: Dec. 18th, 2020; published: Dec. 28th, 2020

Abstract

Using the back analysis method to determine the status of the unstable slope parameters has the advantages of high efficiency and good accuracy. Taking a typical cut slope on the left side of a

文章引用: 汪德兵, 王晓旭, 严俊峰. 基于参数反分析的边坡加固设计研究[J]. 土木工程, 2020, 9(12): 1364-1370.

DOI: 10.12677/hjce.2020.912144

highway as an example, the failure mode of the current slope is analyzed at first, and then the target stability coefficient and working condition calculated by back analysis are determined on this basis. Then through the limit equilibrium parameter back analysis to obtain the slope rock and soil embodiment strength parameter value. Finally, the maximum slope strengthening force satisfying the requirements of each working condition is calculated, and the slope strengthening scheme is given, which was classified by the finite element method. The results are as follows: 1) After back analysis and calculation, the saturation parameter of slope rock mass includes: internal friction Angle is 13° , and the cohesive force c is 15 kPa; 2) Under the condition of rainfall + dead weight, the slope needs the greatest reinforcement force. The slope is strengthened by reducing slope ratio and laying reinforced concrete anti-slide piles in the middle of the slope, and the drainage ditch is set outside the boundary.

Keywords

Cutting Slope, Back Analysis, Strength Parameters, Reinforcement Scheme, Finite Element Method

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

在高速公路的建设中难以避免的要跨越山坡, 需要对原始坡角进行开挖, 路堑边坡的稳定性直接影响下部拟建公路的建设和长期运行安全。由于高速公路工期紧张, 采用反分析的方法确定已失稳边坡的现状参数具有效率高, 准确性好的优点。目前, 国内外诸多学者针对反分析进行了大量研究, 主要可以分为: 1) 基于位移的反分析参数计算[1] [2] [3]; 2) 基于极限平衡的边坡强度参数反分析计算[4] [5] [6]; 3) 基于有限元的边坡变形参数反分析计算[7]。

本文以某高速公路左侧一典型路堑边坡为例, 首先分析现状边坡的失稳破坏模式, 在此基础上确定反分析计算的目标稳定性系数和工况。然后通过极限平衡参数反分析获取边坡岩土体现状强度参数值。最终计算满足各工况要求的最大边坡加固力, 给出边坡加固方案, 并通过有限元计算得到桩的受力分布特征, 以验证设计的正确性, 类似工程提供重要的参考实例。

2. 工程概况

本文研究对象为某公路左侧一段路堑边坡, 沿路线方向长约 80 m, 边坡后缘与剪出口高差约 40 m。边坡在轴向上总体较平缓, 自然坡度 $20^\circ\sim 30^\circ$, 坡面植被不发育, 多为农田, 高速公路在此段主要以挖方的形式通过。

边坡中的岩层为单斜地层, 岩层主要是泥质板岩, 岩层的产状是 $20^\circ\angle 48^\circ$ 。研究段边坡的斜坡为一缓坡, 坡向与坡角分别为 75° 与 17° , 坡向和岩层倾向成横坡向关系。总体节理裂隙十分发育, 岩体极破碎, 局部见少量风化绢云母片, 机械破碎后岩芯多呈砂砾状, 局部见少量碎块状。原岩遇水易软化, 强度降低, 手摸有滑腻感。属软质岩。

目前边坡表面变形情况显著, 其中二级坡的坡面出现了一定的垮塌, 且见有多条贯穿的横向裂缝及若干条的次生裂缝, 边坡对其下方高速公路的施工安全产生了直接的威胁(见图 1)。根据现场踏勘分析及钻探资料表明, 路基削坡开挖是边坡形成的最大原因, 且斜坡下伏强风化层受到地下水的长期作用, 岩土体抗剪强度劣化作用很明显, 而表层土体因施工开挖, 山体原有应力状态被破坏, 从而使得边坡坡

脚段的抗滑力减小，在雨水作用下边坡前缘开挖后也开始发生变形，并推动前缘坡体，综上可以分析，可以认为该边坡的破坏模式应为推移式与牵引式复合式。

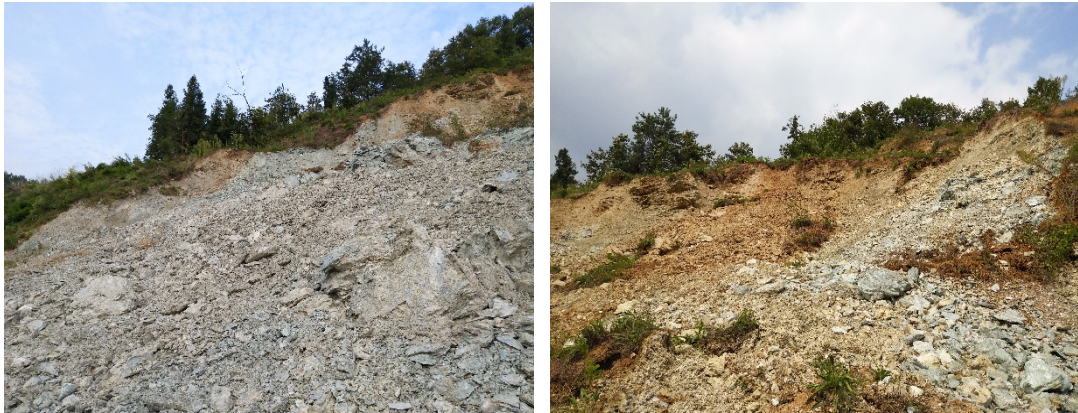


Figure 1. Site slope collapse photos
图 1. 现场边坡垮塌图

3. 现状边坡参数反分析计算

由于边坡直接威胁到下方的高速公路施工安全，同时随着雨季的来临，如不迅速对失稳边坡进行及时处置，可能在降雨作用下诱发更大规模的滑坡。为了及时指导现状边坡的加固方案，采用反分析手段，选取有代表性的部位进行取样，并测定其基本物理力学参数，并结合勘察报告中的室内土工试验资料，依据现状边坡的稳定性，确定暴雨软化后的潜在滑面参数，并为下一步边坡动态分析提供依据。

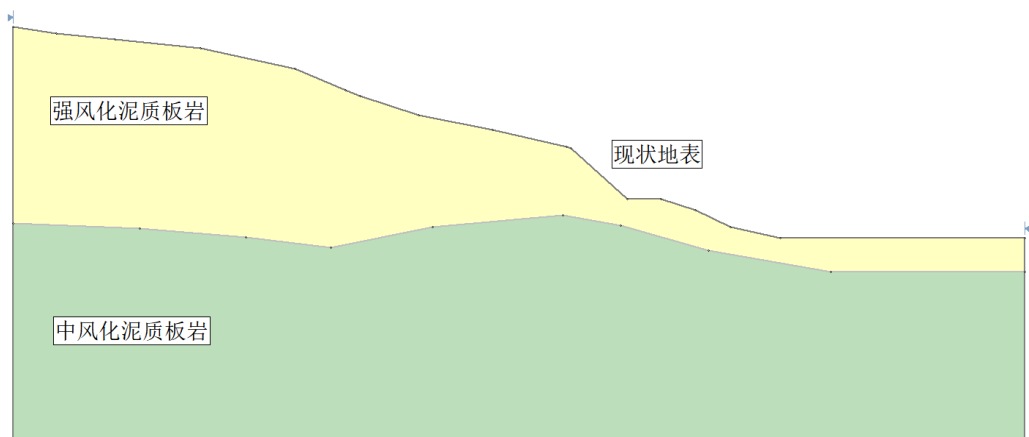


Figure 2. Limit equilibrium calculation model
图 2. 极限平衡计算模型

现状边坡是在暴雨条件下其潜在破坏面受到软化。使得岩土体得抗剪强度明显下降，边坡得变形速度随之加快，最终导致边坡的表层松散层发生滑塌，所以在本次分析中采用的工况为边坡的自重 + 暴雨(饱和状态)，并以现状开挖线建立极限平衡分析模型。反分析的目标是寻找合理的饱和状态强风化泥质板岩强度参数。在本次分析中，因为潜在滑面为圆弧形，采用极限平衡法中的 Bishop 法对其进行计算。具体模型见图 2。以天然状态下强风化泥质板岩的强度参数作为基础(表 1)，将不同组合的折减后的 c 、 φ 代入模型中计算稳定性，计算目标为 0.98 (图 3)。得到的参数组合见表 2。

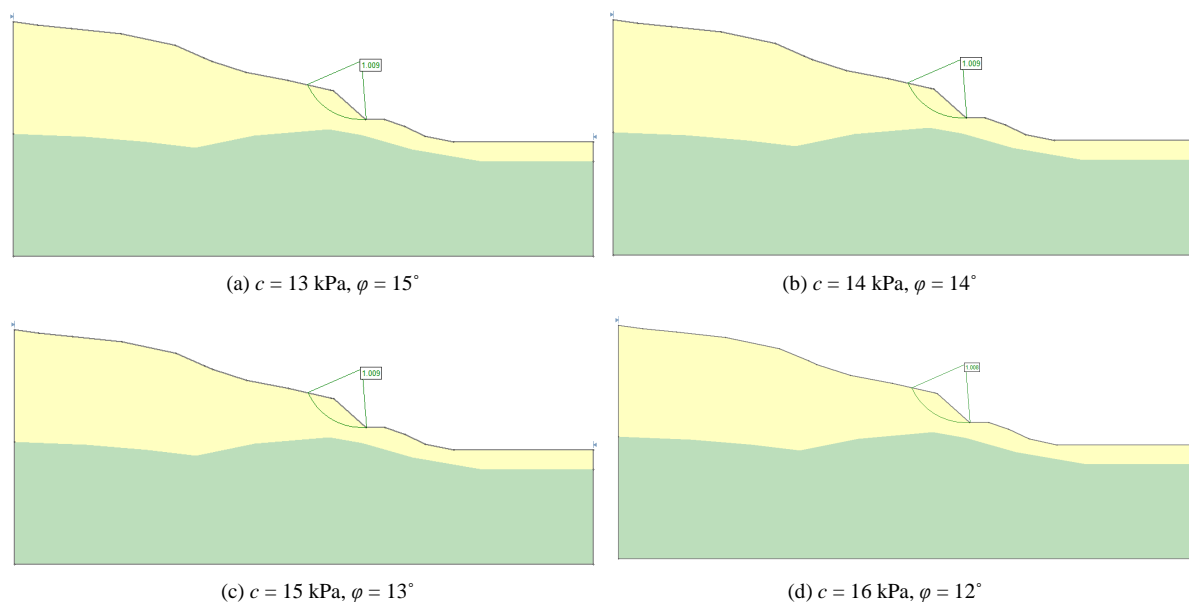
Table 1. Physical and mechanical calculation parameters**表 1.** 物理力学计算参数

岩性	状态	天然状态
强风化泥质板岩	重度(kN/m ³)	20.2
	内聚力 c (kPa)	20.8
	内摩擦角 φ (°)	15

Table 2. Calculation results of parameter back analysis**表 2.** 参数反分析计算结果

内聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)	稳定性系数
13	15	1.01
14	14	1.01
15	13	1.01
16	12	1.01

结合天然状态下强风化泥质板岩的强度参数,认为当内摩擦角取 13°,内聚力取 15 kPa 时能较好地反映岩土体受到雨水软化后的强度情况。

**Figure 3.** The schematic diagrams of calculation results of slope back analysis**图 3.** 边坡反分析计算结果示意图

4. 边坡加固方案设计

考虑到工程治理的紧迫性等特点,依据边坡反分析等计算结果,本文确定对该边坡采用强支挡以及加强排水等综合治理措施,具体的加固方案如下(图 4):

1) 一级边坡的坡面防护将保留原有的设计方案不变,一级坡利用浆砌拱型骨架方案进行防护,该段边坡的坡率设定为 1:1;

2) 二级边坡的坡面防护方案设置为支撑渗沟间菱形框架植草防护,并同时在二级坡上布设有抗滑桩,该段边坡的坡率设为 1:1.25。

本文采用极限平衡计算方法计算二级边坡上所设抗滑桩的抗滑力并确定其尺寸,将分别对自然工况、降雨工况以及地震工况进行分析。参考《公路路基设计规范》(JGTD30-2015)第 7.2.2 条第 1 款有关规定,此边坡的地质条件较为复杂,对所在区域的公路建设以及运营存在着较大的潜在危害,因此计算时所采用的稳定性系数分别:工况一(边坡的自重,即坡体处于天然状态)取值 1.30;工况二(边坡的自重 + 暴雨,即坡体处于饱和状态)取值 1.20;工况三(路基开挖后的自重 + 暴雨 + 地震)取值 1.05。

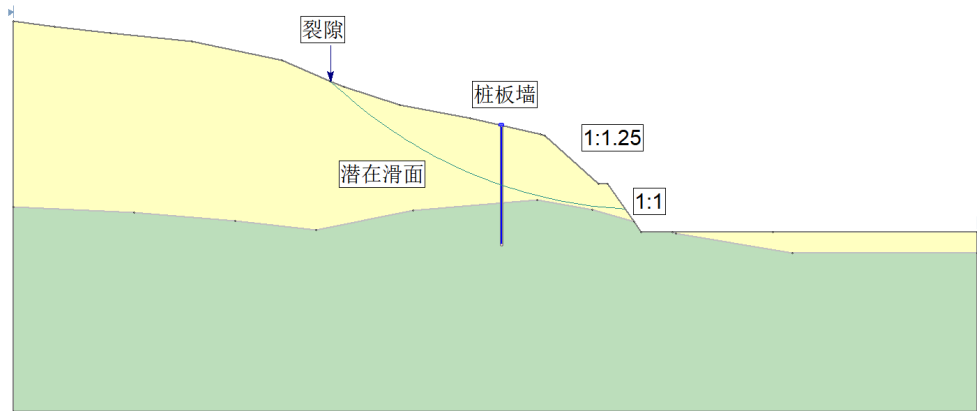


Figure 4. Schematic diagram of reinforcement scheme
图 4. 加固方案示意图

参考《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)中对建构物的抗震设计基本要求,研究区域的场地类型为 I 类,设计地震分组为第二组,故而该区域的地震设计特征周期为 0.25 s,设计基本地震加速度值为 0.10 g,研究区域的抗震设防基本烈度应定为 7 度。地震荷载应按照公路工程抗震设计规范中的要求进行处理,具体的处理办法如下:

$$E_{ns} = C_i \times C_2 \times K_n \times G_s \quad (1)$$

式中: E_{ns} 为水平地震荷载; C_i 为重要性修正参数,取值为 1.3; C_2 为综合影响系数,取值为 0.25; K_n 为水平地震系数; G_s 为重力。

本文将采用拟静力法对设计中的地震惯性力进行计算,计算时只需考虑水平地震力作用。采用拟静力计算的方式计算地震荷载后,得到抗震荷载系数大小为 0.0325。

Table 3. Calculation results of design and reinforcement scheme
表 3. 设计加固方案计算结果

	稳定性系数			所需抗滑力(kN/m)		
	工况一	工况二	工况三	工况一	工况二	工况三
	1.27	1.00	0.93	60.51	404.85	329.28

依据上述最大抗滑力,对桩板墙进行设计(表 3)。于边坡中部布设 12 根钢筋混凝土抗滑桩,以抵抗边坡体产生的的剩余下滑推力。抗滑桩的设计尺寸为 1.6 m × 2.4 m,桩互相关距设置为 5 m,桩身长度为 20~24 m。桩身拟采用 C30 混凝土进行浇注,桩与桩之间放置 2 米高的挡土板进行连接,以防止滑坡土体由桩间剪出破坏;桩顶标高以地面实际标高为准。锚固段为整个桩长的 1/3~1/2。

将整形后的边坡以及加固方案中的桩板墙结构带入有限元计算模型中(图 5),用以研究其受力特征。有限元模型采用平面应变假设,共划分节点 7074 个,单元 3447 个,单元类型为 6 节点三角形单元。在

模型的底部和侧面设有法向约束，桩板墙的设置参数与实际工程一致。从结果中可以看出，桩板墙的主要受力部位距离桩顶的距离大概 10 米左右，其最大轴力为 367 kN，距离桩顶 10.49 米；最大剪力为 358.78 kN，距离桩顶的距离约为 8 米。总体上这些指标均未超过桩板墙的承载能力极限，根据计算结果，桩板墙单元均未屈服，验证了设计的合理性。

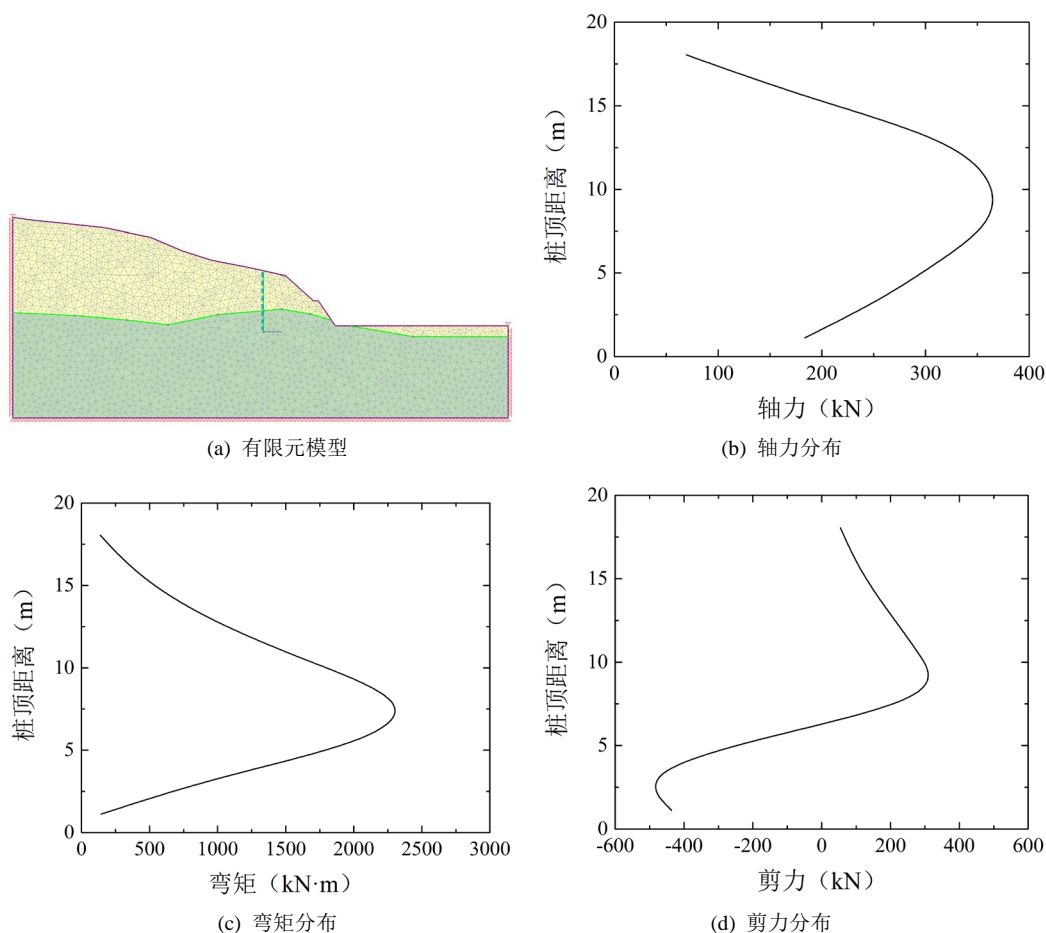


Figure 5. Finite element calculation results of pile slab wall in the reinforcement scheme

图 5. 加固方案中桩板墙有限元计算结果

为了减小降雨以及地下水对边坡岩土体强度的软化作用，边坡边界外必须设置截排水沟，截水沟位置应当依据现场实际情况进行详细的调整。其中：一级边坡的坡体应设置坡体深孔排水管 2 排，以便将坡体内部的积水排除出去。同时必须对坡顶与坡面上已开裂的裂缝及时用粘土或砂浆进行封闭处理，防止地表水下渗入边坡坡体内。

从处置的结果来看，通过采用反分析方法确定岩土体参数，并利用极限平衡方法计算所需抗滑力，最终确定设计加固方案的方法，取得了很好的效果。在同条公路的其他几处路堑边坡的加固设计中也采用了桩板墙 + 排水沟的综合措施，工程完成后，在暴雨工况中均保持了较好的稳定性。这说明本文提出的加固方法具有较好的适用性，能运用在其他类似工程中去。

5. 结论

本文针对目前公路边坡应急加固设计中时间紧、工期短的难点，以某一典型路堑开挖边坡为例，采

用参数反分析的方法确定岩土体饱和参数。以此为基础,分析加固边坡所需的最大加固力。结论认为:

1) 该边坡主要破坏模式是由于坡脚被挖、降雨入渗导致潜在滑体的强度下降,从而引发的表层滑动。经过反分析计算,得到边坡岩土体饱和参数为内摩擦角 φ 等于 13° , 粘聚力 c 为 15 kPa;

2) 根据反分析参数,在降雨 + 自重条件下边坡所需加固力最大。边坡加固采用减缓坡比以及边坡中部布置钢筋混凝土抗滑桩的方式,并且在边界外设置截排水沟,以减小降雨以及地下水对边坡岩土体强度的软化作用。经过有限元方法的验证,表明设计方案是可行的。

参考文献

- [1] 宋宝宏. 基于位移反分析法的边坡失稳计算[J]. 特种结构, 2020, 37(2): 46-50.
- [2] 孙钱程, 李邵军, 赵洪波, 等. 基于位移和松弛深度的岩体参数概率反分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1884-1894.
- [3] 王晓静. 岩质路堑边坡施工监测及稳定性分析[J]. 公路, 2015, 60(9): 41-45.
- [4] 龙赛琼, 陈焕美, 蒋文鹏, 等. 考虑边坡不同演化阶段的岩土体抗剪强度参数反分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1): 16-21.
- [5] 贾锋. 基于反分析法的均质路堑滑坡治理技术研究[J]. 交通节能与环保, 2016, 12(3): 49-52.
- [6] 陈静瑜, 赵炼恒, 李亮, 等. 基于 Excel 数据表和极限分析法的滑坡抗剪强度参数反演分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 827-834.
- [7] 朱彦鹏, 马金莲, 叶帅华, 等. 基于强度折减法的边坡岩土体抗剪强度参数反演[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3): 36-41.