

高填方抗滑桩加固效果监测分析

刘俊佳

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:在某倾斜地基上进行中心填高为26.5 m的高路堤工程,为保护坡脚民房,采用抗滑桩进行高填方加固。在高填方施工完成后,在降雨期间对抗滑桩进行位移监测,并与计算结果进行对比。运用MIDAS GTS软件对加固边坡的安全系数、桩体位移内力和坡体位移进行分析,同时结合现场桩体位移监测结果进行反分析。结果表明:抗滑桩能够显著提高边坡的安全系数,限制坡体沿倾斜地基发生位移;在边坡安全系数较高的情况下,抗滑桩桩顶、坡脚部位仍会产生较大的位移;在降雨工况下,填筑材料力学参数宜进行0.8倍折减,为高填方的加固设计和数值分析提供了参考依据。

关键词: 抗滑桩;位移;高填方;加固设计

中图分类号: TU318

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0354-05

Monitoring and Analysis on Reinforcement Effect of High-fill Anti-slide Piles

LIU Junjia

[Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: A high embankment project with a central fill height of 26.5 m is carried out on a sloping foundation. In order to protect the civil buildings at the foot of the slope; the anti-slide piles are used to reinforce the high fill. The displacement of the anti-slide piles is monitored during the rainfall after the completion of the high fill construction. MIDAS GTS software is used to analyze the safety factor; pile displacement; internal force and slope displacement of the reinforced slope; and the back analysis is carried out in combination with the on-site pile displacement monitoring results. The result shows that the anti-slide pile can significantly improve the safety factor of the slope and limit the displacement of the slope along the sloping foundation. Under the condition of higher slope safety factor; there will still be considerable displacement at the top and foot of the slope of the anti-slide piles. Under the condition of rainfall, the mechanical parameters of filling materials should be reduced by 0.8 times; which provides a reference for the reinforcement design and numerical analysis of highfill.

Keywords: anti-slide pile; displacement; highfill; reinforcement design

0 引言

高填方工程会引发路基沉降、边坡滑移、地基破坏等问题,《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[1]规定,超过一定高度的填方工程应与桥梁工程进行技术经济比选。但在实际公路工程项目中,为消纳土方,保持土石平衡,高填方路基的产生不可避免。除公路高填方外,山区机场的兴建也对高填方设计研究提出迫切要求^[2]。

高填方研究主要侧重于填方力学参数选取^[3]和填方沉降规律分析^[4]方面,对倾斜地面上的填方工程探索不足。由于原填筑面是倾斜的,即使填方的

材料和强度达到一定程度,边坡仍存在沿原状土与填方交界面滑动的风险。随着建设用地的不断开发,在斜坡地基上进行工程作业的项目越来越多^[5-6],因此,有必要对斜坡地基进行深入研究。对于在倾斜地基上进行的高填方工程,其加固方式主要采用抗滑桩。吴红刚等^[2]的模型试验表明,埋入式抗滑桩与填土刚度不匹配,需要在桩顶增设垫层,以控制坡体变形;胡其志等^[7]采用数值模拟的结果表明,通过约束抗滑桩桩顶,能够减少暴雨状态下高填方的坡体位移;牌立芳等^[8]采用FLAC3D软件,研究了晋城沁水地区高填方抗滑桩的动力响应。

本文以实际高填方工程为例,基于数值分析和现场监测,分析大直径、变截面抗滑桩在高填方工程加固设计中的位移特征。

收稿日期: 2025-02-27

作者简介: 刘俊佳(1996—),男,硕士,工程师,从事岩土及基坑支护设计研究工作。

1 工程概况

某道路工程位于云贵高原和四川盆地交界地带的半坡间,其地势为南高北低,山脉呈南北走向或西南—北东走向。此地冷空气易进难出,境内常云雾缭绕,全年气温不高,晴天较少,雨日较多,湿度较大。道路中线设计填高为 26.5 m,原地面为 1:4 的自然斜坡。工程共分 5 级填筑,坡率自上而下分别为 1:1.5, 1:1.5, 1:1.75, 1:1.75, 1:2, 每级坡高为 8 m。路基填料由开挖出来的强风化泥质粉砂岩和中风化泥质粉砂岩经破碎后与素土按 3:7 混合而成。碎石的粒径为 40~50 mm,为角砾状,土由中砂和细砂组成,粒径约为 0.2 mm。

岩土层自上而下分别为 0.5 m 厚①₁杂填土、4 m 厚②₁含砾黏土、3.5 m 厚③强风化泥质粉砂岩、④中风化泥质粉砂岩。勘探钻孔尚未探测到地下水位。受地表水的影响,部分路段②₁含砾黏土层呈软可塑状。

由于坡脚 10 m 外存在民房,为防止填方沿原地面滑动和保护民房结构,项目设计采用 2 排抗滑桩板墙分级抗滑,抗滑桩混凝土等级均为 C30 混凝土。在第二级和第三级填方平台处采用抗滑桩支挡,截面形式为下圆上方:地面以下桩身部分采用钻孔灌注桩,桩身为圆形截面,直径为 2 m;地面以上桩身部分宜采用立模工艺现浇,桩身为矩形截面,截面尺寸为 1.5 m×2.0 m,中心间距为 4 m。2 种截面的连接处采用 1.5 m×2.5 m 的转换梁进行连接。此外,只有混凝土达到设计强度后才可进行路基填筑,且填筑时应在桩前和桩后同时分层填筑。桩身应伸入清表后的地面以下不小于 10 m,并进入中风化泥质粉砂岩层不小于 2 m。该变截面抗滑桩结合了圆形桩容易机械成孔、安全高效的特点和矩形桩抗滑桩抗弯刚度大的特点^[9]。

在路基填土填筑前,应进行地表水的疏干,并对呈软塑状的黏土进行挖除处理,换填碎石,分层压实,压实度不小于 0.95。原地面清表后应挖台阶,台阶宽度不应小于 2 m。路基填料应分层压实,压实度不低于相关规范对路基最小压实度的要求。

2 数值模型

2.1 材料参数

本文采用 MIDAS GTS 软件进行数值计算,岩土体采用莫尔—库伦本构模型模拟。模型长 325 m,高

100 m。地层参数来源于地质勘察报告。路基填土的参数来源于施工方的室内快剪试验,测得填土的最大干密度为 1.75 g/cm³,含水量为 21.2%,经换算后,重度取 21.5 kN/m³。《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[1]建议的取值为 18~20 kN/m³。本次计算考虑了排水不畅导致坡体重度增加的不利情况,计算参数如表 1 所示。

表 1 主要计算参数

土层编号	岩(土)层名称	重力密度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	内聚力 c/kPa
① ₁	杂填土	17.0	3.0	3.00	8.00
①	耕植土	17.0	3.0	3.00	8.00
② ₁	含砾黏土	19.1	5.11	11.59	30.90
③	强风化泥质粉砂岩	20.0	25.0	25.00	40.00
④	中风化泥质粉砂岩	26.0	30.0	30.00	80.00
人工填土	路基填土	21.5	5.0	20.00	27.00
支挡	抗滑桩	25.0	3.3×10^4		

抗滑桩采用弹性本构,桩全长与周边岩土层建立摩擦界面,嵌固段与地层建立弹性连接。

场地的地震烈度为 7 度,综合地震影响系数取 0.025,按拟静力法验算地震工况。

2.2 计算工况

每级填方的填筑周期约为 3 周,计算时考虑到施工工艺,项目设计将高填方过程分为 4 个填筑阶段,自下而上每级填方的填筑高度为 8 m。为探究变截面抗滑桩的支挡效果,项目设计建立了无抗滑桩和变截面抗滑桩 2 种工况的数值模型(见图 1)。

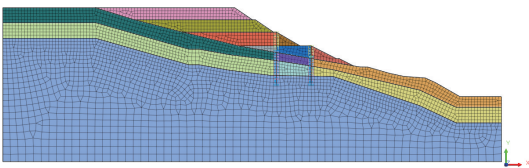


图 1 高填方模型

2.3 计算结果

2.3.1 安全系数

在无抗滑桩时,高填方坡体的滑移面明显,表现为从坡顶路面开始,经过表层土,从填方坡脚剪出,贯穿整个填方区,最大剪应变为 2.63。在采用抗滑桩时,桩前主动区滑移面消失,最不利滑移面出现在桩后第四、第五级填方与原地面交界处,最大剪应变为 2.05,滑移区土方量约为无抗滑桩时的 2/5 倍(见图 2 和图 3)。

各施工阶段的边坡安全系数如图 4 所示。随着

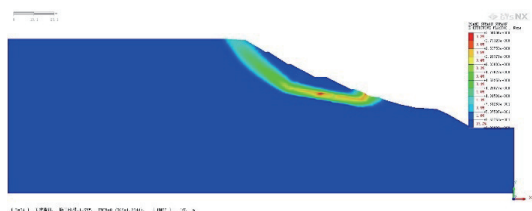


图2 无抗滑桩时高填方滑移面

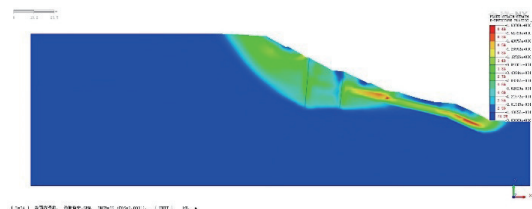


图3 采用抗滑桩加固后高填方滑移面

填方高度的增加,边坡整体安全系数逐渐减小,在采用抗滑桩时,边坡整体始终有较大的安全系数。

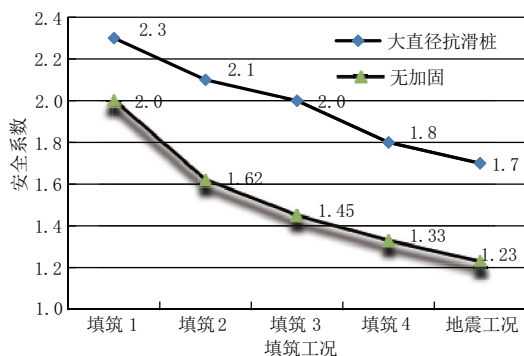


图4 高填方各施工阶段的安全系数

2.3.2 支挡内力

边坡填筑完成后,前排桩(远离坡脚)、后排桩(靠近坡脚)的桩身最大位移分别为10.5 cm和8.4 cm,均位于桩顶。对于前排桩,桩身位移在桩顶及填土与原地面的交界处较大,且在与后排桩桩顶同一高程处,桩身位移在明桩段达到最小。这说明后排桩桩顶和大平台对前排桩的位移起到控制作用。在地震工况下,桩顶位移分别增大到14.6 cm和10.8 cm,增加了约35%。在不设抗滑桩工况下,填方体沿原填筑面最大水平位移为18.9 cm;在设抗滑桩工况下,填方体沿原地面最大水平位移为10.9 cm(见图5)。

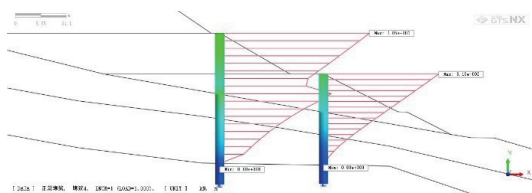


图5 高填方抗滑桩位移

后排桩(靠近坡脚)的明桩段出现楔形体破坏模式,破裂角度约为 50° ,楔形土体最大水平位移为21.1 cm,后排桩最大水平位移为7.47 cm,桩土相对

位移为13.63 cm,填方体呈现从桩间滑出的趋势。前排桩(远离坡脚)桩后填方体呈现整体圆弧滑动趋势,没有明显的桩土水平位移。由模拟的破坏形式可知,后排桩可依据土压力理论来计算桩身侧向力,前排桩则应依据滑坡推力来计算桩身侧向力,滑坡面近乎为原地面。双排桩的计算应考虑后排桩的土拱效应^[10](见图6)。

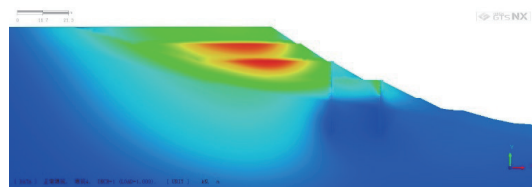
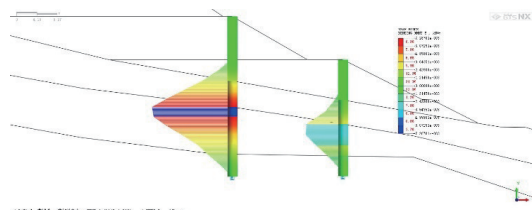
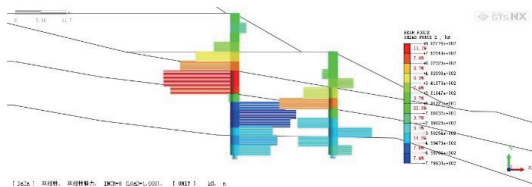


图6 高填方坡体位移

如图7所示,抗滑桩的反弯矩较大,前排桩的最大弯矩为7 297 kN·m,最大剪力为1 486 kN,后排桩的最大弯矩为3 648 kN·m,最大剪力为628 kN。靠山侧的弯矩较大,说明采用非对称的配筋模式较为合理。剪力最大处发生在原地面处,该处已设置转换梁。



(a) 弯矩(单位: kN·m)



(b) 剪力(单位: kN)

图7 抗滑桩内力

3 现场实测

监测点布设如图8所示:Z1~Z8为双排变截面抗滑桩实际施工区域。由于施工时序安排,部分抗滑桩是在填方完成后才施工,此时原设计的变截面大直径抗滑桩已无法施工,须改变工艺,采用D1.2@3 m 钻孔灌注桩双排抗滑桩,桩顶设连系板。Z9~Z12为双排桩,桩径为1.2 m,间距为3 m,高填方施工后采用钻孔灌注。T1~T8的监测数据统计周期为7~8 d,由于T7~T10期间连续降雨,研究将T8~T13的监测数据统计时间间隔加密为1 d。在高填方填筑完成约3个月后,项目团队对抗滑桩进行位移监测。大直径抗滑桩监测数据如图9至图10所示。

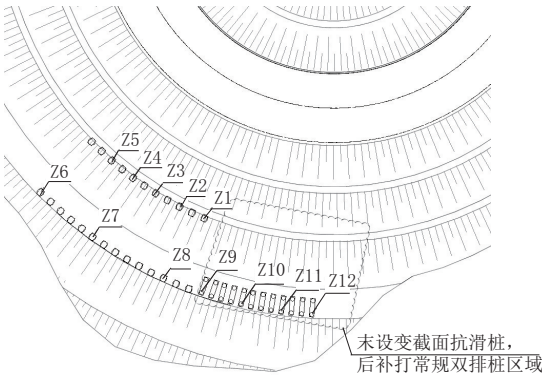


图 8 抗滑桩位移监测布点图

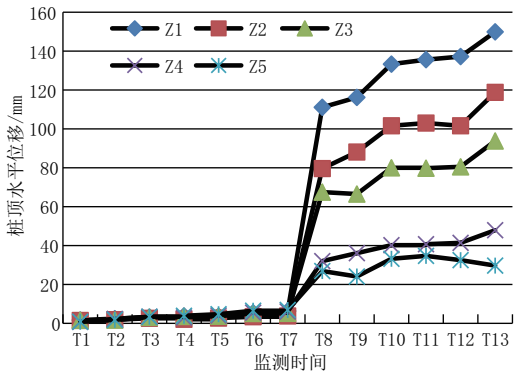


图 9 前排变截面抗滑桩监测位移

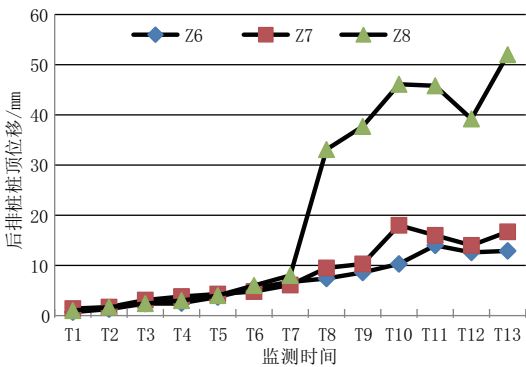


图 10 后排变截面抗滑桩监测位移

当高填方填筑至设计标高后,项目团队对抗滑桩的桩顶位移进行监测。在监测期的前 2 个月,即 T1 ~ T7 期间,抗滑桩的桩顶位移缓慢增加,前排桩最大位移为 6.9 mm,后排桩最大位移为 8.0 mm(见图 11)。

T7 ~ T8 为半个月的降雨期,雨量为小雨或中雨。

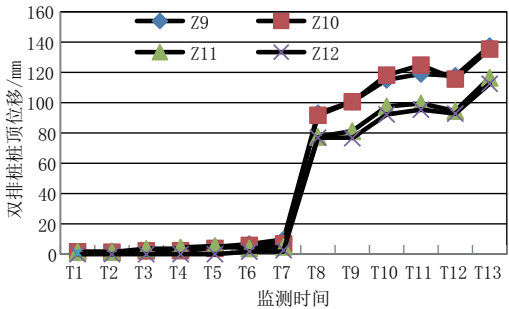


图 11 双排桩桩顶位移监测数据

由监测数据可知,经历过长降雨期后,前排抗滑桩的最大水平位移为 15 cm,大于后排抗滑桩的最大水平位移 5.2 cm。双排桩的最大变形为 13.7 cm。越靠近不同桩型的分界线处,桩顶位移越大,远离桩型分界线处的 Z5、Z6 和 Z12 测点的位移较小。推测抗滑桩的滑动方向为 Z1 ~ Z10,主滑区域为 Z1 ~ Z8 和 Z9 ~ Z12,即滑坡沿着抗滑能力较弱的 D1.2@3 m 钻孔灌注双排抗滑桩的方向发展。由于 Z9 ~ Z12 前期未设支挡,在施工过程中,填筑体已发生沿含砾黏土层的滑动,这导致滑面强度参数降低,在雨水的浸润下,坡体重新滑动,进而带动整个填方体滑动变形。而 Z1 ~ Z8 区域在高填方填筑前就已施工安装抗滑桩,且填筑过程中未观测到明显位移,坡面仍是原土土层的强度。因此,该区域内的抗滑桩桩顶位移较小。

由监测数据可以看出,D1.2@3 m 钻孔灌注双排桩即 Z9 ~ Z12 各个断面之间的位移差别较小,而大直径桩 Z1 ~ Z8 之间的位移差别较大。这是由于 D1.2@3 m 钻孔灌注双排桩的前、后桩均设有冠梁,整体性较好,而大直径抗滑桩因未设冠梁导致受力分散,仅有少部分桩位移超过 10 cm。因此,在滑坡推力空间变化的支挡工程中设置冠梁,既要考虑增强其整体受力的需要,又要考虑桩的差异变形位移,对于有足够截面尺寸的抗滑桩,设置冠梁的必要性不强。为控制填方体的变形,项目设计将最下面 2 级的填方坡率分别由 1:1.7 和 1:2 变成 1:2.5 和 1:3,边坡及抗滑桩最终稳定。由于采用全埋式抗滑桩,抗滑桩位移虽然达到 10 cm,但填方坡体最终变形稳定,因此,研究团队认为其整体是安全的。

4 监测与计算结果反思

前排桩的最终实测变形与计算值相差了约 33%,推测有以下 2 种原因。

一是该段斜坡路堤原本为地势低洼区域,长时间的持续性降水导致地下水不断累积,水位升高导致动静水压力、浮托力和渗透力持续增大。而路堤长时间处于饱水状态,其底部及基底逐渐软化。在这种情况下,含砾黏土层及填筑土层的抗剪强度降低,引起路堤发生较大变形。

填筑体的渗透系数较小,而含砾黏土层的渗透系数较大,持续的降雨从原有的山体面渗入,使填筑体成为饱水状态。加之施工过程中,填筑体沿原地表蠕动,导致含砾黏土层的参数降低,而原有地勘报告并未提及有地下水,数值计算高估了滑面参数,导

致实际变形较大。由于本项目未对深层水平位移进行监测,参考数值模拟结果将原地面假定为既有滑动面,考虑到滑坡的稳定状态,按 $F_s=1.1$ 进行数值模拟。经过参数反演,滑动面参数(含砾黏土层)为原来的0.4倍。

二是原山体被植被覆盖,且填方体较厚,研究表明^[11],在降雨作用下,浅层土体的饱和度较大,半月的降雨量并不能使含砾黏土层的含水量有明显增大。此外,大直径抗滑桩在抵抗滑面位移方面已有足够的富余量。研究着重考虑降雨入渗导致填方体基质吸力减弱,因此,对填料材料的力学参数设计值进行0.8倍折减,即黏聚力值为16 kPa,内摩擦角为 22° 。计算得到的前排桩位移结果为16.4 cm,与实际数值较为接近,但后排桩计算结果为10.1 cm,大于实际观测位移数值5.2 cm。数值计算结果低估了前排桩的变形而高估了后排桩的变形。这是由于二维计算并未将土拱效应考虑在内,导致在计算中后排桩分担了比实际更多的推力。

由于现场施工暗桩时桩基出现塌孔,且含砾黏土层富含水分,现场观测时并未观测到填方坡体渗流的情况。推测第一种原因的可能性较大。

桩体的变形特征受原地形地貌的汇水条件及填料饱和度的影响较大。已有较多的学者对降雨入渗导致的抗滑桩位移增大进行研究^[12]。但在实际工作中,非饱和土的参数值较难获取,因此,在工程设计时考虑非饱和特性的定量化计算有一定困难。本文是将简单的力学参数研究与实际数值作对比,对于本工程中非饱和特性对抗滑桩位移的影响将在后续工作中展开研究。

5 结 论

(1)当高填方原填筑面为倾斜时,原填筑面可能成为潜在的滑动面,滑面剪出口坡脚的变形最大。

(2)在高填方完成后,填筑体经历了初始蠕动期。在降雨条件下,坡体位移可能发生加速蠕变,之

后再次进入蠕动期。高填方的稳定性判断,应结合坡体位移计算进行综合评估,单一的边坡安全系数评估具有明显的局限性。

(3)当采用抗滑桩时,高填方土体蠕动具有明显的空间效应,即沿着抗滑力较弱的方向滑动。因此,二维分析法具有一定的局限性。

(4)对于倾斜地基上的高填方,除应关注填筑范围内的稳定性外,还应关注坡脚在侧向压力情况下产生的次级滑动问题。

(5)降雨对深厚高填方的主要影响体现为对原地表土层或填料力学参数的折减。基于以上分析,本文提出,在降雨工况下,宜对填料的力学参数进行0.8倍折减。

参 考 文 献:

- [1] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].
- [2] 吴红刚,牌立芳,赖天文,等.山区机场高填方边坡桩—锚—加筋土组合结构协同工作性能优化研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(7):1498-1511.
- [3] 杨洲,程晓辉,麻强,等.高填方地基不排水稳定性分析强度指标研究[J].岩土力学,2022,43(1):218-226.
- [4] 柴玉卿,郑双飞,李旭,等.高填方工程工后沉降演化规律研究综述[J].中国矿业,2022,31(9):179-188.
- [5] 王俊峰,李芒原,孙健,等.单排抗滑桩支挡型黄土边坡坡脚基坑开挖诱发坡体滑动的演化过程研究[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2541-2545.
- [6] 周宴民,杨兴义,何忠爱,等.基岩陡降地质条件下高层住宅基础设计[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2325-2330.
- [7] 胡其志,王浩杨,周勇,等.降雨对抗滑桩加固边坡稳定性的影响[J].湖北工业大学学报,2022,37(4):75-80.
- [8] 牌立芳,吴红刚,杨涛.高填方滑坡抗滑桩地震动力响应分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(5):126-134.
- [9] 魏少伟,隋颜阳,杨建民.圆形与矩形截面抗滑桩抗滑性能的模型试验研究[J].岩土力学,2019,40(3):951-961.
- [10] 薛德敏,李天斌,张帅.基于位移控制的双排桩桩后滑坡推力计算方法[J].岩土工程学报,2023(9):1979-1986.
- [11] 曹硕鹏,付宏渊,高乾丰,等.降雨作用下裂隙红黏土边坡渗流特征与冲刷模式[J].中国公路学报,2022,35(5):33-43.
- [12] 文海家,张岩岩,付红梅,等.降雨型滑坡失稳机理及稳定性评价方法研究进展[J].中国公路学报,2018,31(2):15-29;96.