

文章编号: 1007-2993(2022)05-0377-05

基于岩土工程反分析的藏区公路 隧道弃渣场稳定性研究

满 君¹ 任志善² 孙光吉³ 邓小龙³

(1. 中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100053; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082;
3. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100089)

【摘要】 以西藏某公路隧道弃渣场边坡为例, 运用岩土工程反分析技术, 采用 Morgenstern-Price 法对边坡进行稳定性评价, 并对弃渣场边坡失稳后形成堰塞的可能性进行评判。研究成果表明: 该弃渣场边坡失稳的主要诱发因素为①坡脚开挖, ②集中、超高堆载, ③排水不畅; 正常工况下边坡稳定最小安全系数为 1.062, 处于基本稳定状态; 非正常工况(暴雨工况)下边坡稳定最小安全系数为 0.940, 处于不稳定状态; 经评判, 暴雨工况下弃渣边坡失稳后形成堰塞湖的可能性较小。研究成果可为类似工程提供参考。

【关键词】 隧道工程; 弃渣场; 边坡稳定性; 岩土工程反分析; 数值模拟

【中图分类号】 P 642.22

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.05.006

Stability Evaluation Based on Geotechnical Back-analysis Method for Abandoned Slag Field of a Highway Tunnel in Tibet

Man Jun¹ Ren Zhishan² Sun Guangji³ Deng Xiaolong³

(1. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China; 2. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China; 3. China Highway Engineering Consultants Corporation, Beijing 100089, China)

【Abstract】 Based on back-analysis of geotechnical technique, Morgenstern-Price method was employed to estimate the stability of an abandoned slag field of a highway tunnel in Tibet. The demonstrability of dammed lake formation was also analyzed. The results showed that the unstable slope of the abandoned slag field was recognized and caused by three main reasons: excavation of the slope foot, immoderately slagging and absence of drainage facility. Under normal conditions, the minimum safety factor of slope stability is 1.062, which is in a basically stable state. Under abnormal conditions (rainstorm conditions), the minimum safety factor of slope stability is 0.94, which is in an unstable state, and there was little chance of dammed lake induced by the landslide. The research results can provide reference for similar projects.

【Key words】 tunnel engineering; abandoned slag field; slope stability; geotechnical back analysis; numerical simulation

0 引言

弃渣场是公路隧道工程中的重要附属工程, 渣体一般沿沟谷斜坡堆积, 渣体物质多为松散碎石土, 具有孔隙率大、强度低等特点, 在降雨、地震等不利工况下, 若防护设置不当, 极有可能引起渣场边坡失稳, 进而对周边环境造成严重影响。为此, 前人在公路、矿山、水利、铁路排土场边坡稳定性评价与治理方面开展了大量研究。程晓伟等^[1]在对某高速公路滑坡成因分析的基础上, 提出了锚索抗滑桩、锚索框

架(地梁)、坡面防护、疏排地表(下)水以及坡前反压应急预案等综合治理措施, 工程实例验证治理效果良好。邵丽霞等^[2]依托十天高速汉中西段填方高边坡病害治理工程, 总结了填方高边坡的病害类型及失稳破坏模式。在前人研究基础上, 贺 鹰等^[3]依托山西太原西山运煤公路专线, 系统探讨了线路滑坡不良地质评估工作的要点。在边坡稳定性分析方面, 张其唯等^[4]采用 FLAC3D 与刚体极限平衡法对比分析了某矿山排土场的稳定性。柏 森^[5]采用 Geoslope 与

MIDAS-NX 数值模拟分析评价了某采矿隧道出口弃渣场边坡治理前后的稳定性。曹启增^[6]运用 Geo-Studio 数值模拟和极限平衡方法建立了隧道弃渣场边坡降雨入渗数值模型。姜游^[7]利用渗流分析软件 Geo-seep 和极限平衡分析软件 Geo-slope 分析得出渗流计算工况下渣场边坡的局部和整体的稳定性。张秋月^[8]采用 Slide 软件对某铁路隧道弃渣场边坡的稳定性进行了分析。梁振宁等^[9]基于强度折减方法运用 FLAC3D 及理正软件对成贵高铁高山田隧道出口的 1 号弃渣场进行了稳定性分析。

前人在弃渣场边坡稳定性评价及治理措施方面积累了丰富的研究成果。但由于山区高速公路地形地质条件复杂,弃渣一般会就近地堆置在低洼沟谷地带^[10],致使勘察作业条件受限,进而导致对弃渣场的勘察深度和精度往往不够。此外,在稳定性分析中,岩土体计算参数的选取往往依赖于经验类比,具有一定的主观随意性^[11]。因此,以现场工程实体所监测到的、可反映系统实际力学行为的物理参量(如荷载、位移等)为基础数据,通过一定的反演模型,来反向推演得到系统内在力学参量(如本构模型参数)的岩土工程反演分析方法在工程实践中逐渐得到重视和应用^[12-13]。基于此认识,本文针对公路建设项目的特点,以藏区高速公路某隧道弃渣场为例,结合现场监测数据,采用岩土工程反分析及 GeoStudio 数值模拟软件对弃渣场边坡的稳定性进行了分析,并评判了特殊工况下弃渣场边坡失稳形成堰塞湖的可能性,为公路建设项目中弃渣场的科学管理提供参考。

1 工程概况

弃渣场位于西藏某高速公路隧道 1#斜井进口西南侧,堆渣体积约为 $1.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。渣场底部标高为 4500 ~ 4502 m,顶部标高 4530 ~ 4532 m,中部设有一宽度不等的平台。渣堆临空面一般堆高 10 ~ 30 m,坡度 $11^\circ \sim 30^\circ$ 。弃渣场边坡前缘地势低洼,为“U”形沟谷,坡脚有一常年河流自东南向西北流经场区,沟谷下游约 100 m 为农业居民区。根据现场调查,弃渣场坡体后缘局部出现横向拉裂缝,由于渣场前缘邻近河道与居民区,为保障居民生命财产安全,需对该弃渣场边坡进行稳定性评价,对边坡失稳引发堰塞湖次生灾害的可能性进行评判,进而采取边坡防护治理措施。

2 工程地质条件

研究区区域构造位于冈底斯—念青唐古拉陆块上,北侧为怒江缝合带,南侧为雅鲁藏布江缝合带。区内无大的褶皱构造及断裂构造,但局部地段受区域

构造影响发育小型揉皱,岩体破碎,变质岩广泛发育。地形地貌属构造侵蚀切割中高山,海拔 4500 ~ 4700 m,坡陡谷深,地形起伏高差大。植被发育一般,多为灌木草皮,局部基岩出露。月最大降雨量 260 mm,最大日降雨量 44 mm。

弃渣场所在斜坡及溪沟、河流岸坡表层覆盖第四系残坡积物(见图 1),主要为粉质黏土、碎石土等风化残积及重力堆积,结构松散,厚度 0 ~ 5 m,下伏下白垩统炭质板岩(见图 2)。



图 1 弃渣场边坡覆盖层



图 2 弃渣场边坡局部出露板岩

3 弃渣场边坡稳定性分析

3.1 弃渣场边坡现状

根据地质测绘与现场调查,该弃渣场边坡平面上呈“簸箕形”,滑体下宽上窄,中间厚且突出,两侧稍低,后缘较陡。边坡坡顶高程为 4547 m,坡脚高程为 4502 m,相对高差 45 m,南北向宽 90 m,东西向长 120 m,边坡整体坡度约 30° 。调查期间坡体已发生滑动,边坡坡体及两侧边界处可见多处明显裂缝,后缘张拉裂缝尤为明显,裂缝宽 2 ~ 22 cm,最大延伸长度 35 m(见图 3)。

为掌握边坡变形动态,共在弃渣场坡体上布设 22 个位移监测点(见表 1、图 3)。从表 1 的监测数据可以看出,表面最大相对位移出现在 B9、C6 监测点,最大相对位移量分别为 3.34 cm、3.32 cm,且两监测点均位于裂缝 LF1-4 附近。

根据坡体表面相对位移等值云图(见图 3),坡体位移主要发生在裂缝 LF2-1 下部,变形集中在坡体西北部、堆渣平台上方的部位(图 3 中红色区域)。可初步判定形成了浅层堆积层滑坡,滑动方向为东北

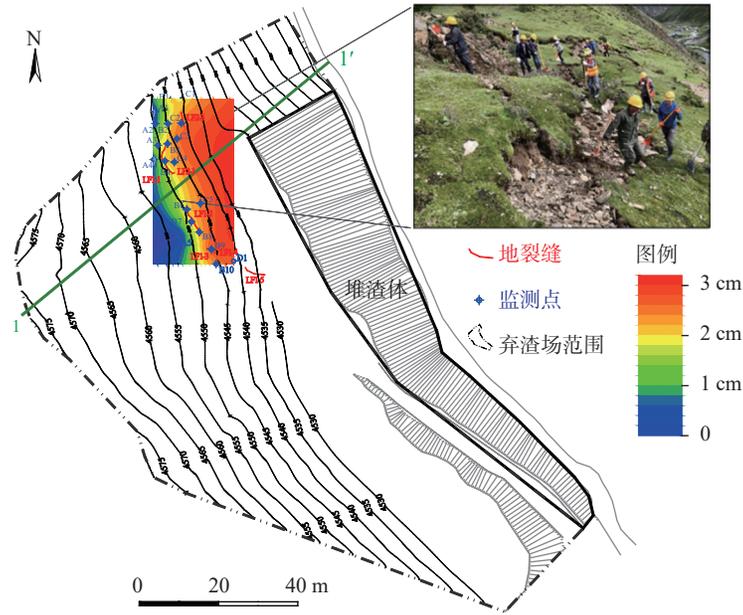


图3 弃渣场边坡现状示意图

向, 该弃渣场不稳定斜坡形成的主要原因为开挖坡脚、集中堆载、排水不畅。

表1 弃渣场坡体沉降监测数据

监测点	相对位移/cm	监测点	相对位移/cm	监测点	相对位移/cm
A1	0.990	B1	2.62	C1	2.51
A2	1.140	B2	2.55	C2	3.05
A3	2.404	B3	2.56	C3	3.12
A4	0.750	B4	2.62	C4	2.76
A5	0.539	B5	2.39	C5	2.98
A6	1.166	B6	2.62	C6	3.32
		B7	2.48		
		B8	2.72		
		B9	3.34		
		B10	3.00		

3.2 物理力学参数反演

工程地质调查表明, 该滑坡系发育在上覆第四系碎石土中的浅层滑坡, 主滑方向约 NE50°, 后缘拉裂缝东西向延伸约 60 m, 坡体表层有草皮覆盖。坡体下覆基岩为板岩。分析该滑坡所处的工程地质条件及诱发因素, 可初步判定该滑坡系坡脚开挖诱发的牵引式滑坡。

据此, 可认为滑坡在该坡体开挖坡脚后、未堆砌渣体前, 处于欠稳定状态($1.0 < F_s < 1.05$)。将已出现的后缘裂缝作为位移边界条件, 采用岩土工程反分析的方法来确定有关物理力学参数。主要步骤如下:

①建立该斜坡 1-1'剖面在开挖坡脚后、未堆砌

渣体前的工程地质模型(见图 4)。

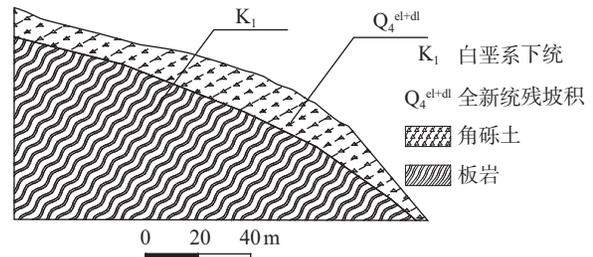


图4 弃渣场边坡 1-1'工程地质剖面图 (坡脚开挖后、弃渣堆砌前)

②以裂缝 LF1-1 为边界条件, 该裂缝距 1-1'剖面起点(1 点)约 100 m(见图 5)。以图 5 所示的剖面建立稳定性计算模型。

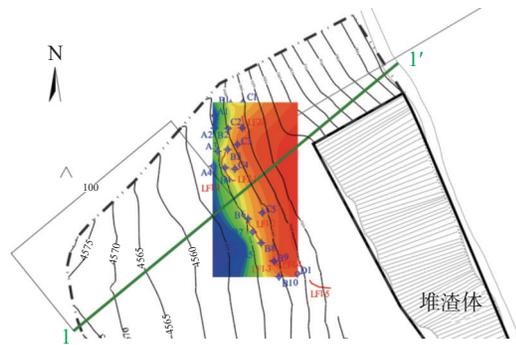


图5 1-1'剖面与 LF1-1 裂缝相对位置关系

③利用 Geoslope 岩土计算软件, 选用 Morgenstern-Price 极限平衡计算方法, 调整岩土计算参数反演使得该剖面上的最不利滑动面的后缘与裂缝 LF1-1 的位置基本对应(见图 6), 进而确定相关物理力学参数(见表 2)。

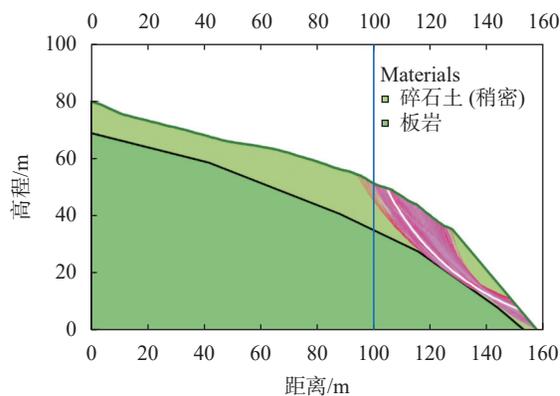


图6 1-1'剖面稳定性计算结果示意图

表2 弃渣场边坡岩土物理力学参数推荐值

岩土体类型	重度/(kN·m ⁻³)		黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
弃渣(板岩岩块)	22	22	11	9.9	28.5	25.6
碎石土(稍密)	24	25	29	26	30	27
板岩	25.8	26.8	1376	1000	33.8	28

图6中红色弧线表示安全系数介于1.0~1.05之间的滑面。可以看出,这些滑面的后缘基本上位于100m左右的位置。因此,可将得到该分析结果所选用的物理力学参数作为弃渣场稳定性分析所采用的参数(见表1)。需要注意的是,在该剖面的反演计算中未涉及弃渣体的物理力学参数。由于弃渣体的物质组成为松散堆积的板岩岩块,因此,其物理力学参数的选取参考了下覆完整基岩的参数值,并在一定程度上进行了相应的折减。

3.3 稳定性评估

3.3.1 评价方法

弃渣场边坡稳定性的评价采用了目前应用最广泛的极限平衡法,针对本弃渣场的岩土成分以及潜在失稳破坏的特点,借助了Geoslope岩土计算软件中的Morgenstern-Price法进行评估。计算工况考虑了正常运用工况和非正常运用工况,由于该弃渣场工程所在区域地震基本烈度为VI度,故非正常运用工况仅考虑了暴雨工况。

根据《公路滑坡防治设计规范》(JTG/T 3334—2018)^[4]规定,综合考虑本项目的危害程度、公路等级、周边环境及工程重要性,确定弃渣场边坡防治工程等级为III级别。相应地,弃渣场边坡稳定性安全系数控制标准为:正常运用工况下为1.10;非正常运用工况下为1.05。

根据工程地质勘察,选取图5典型的1-1'剖面建立工程地质模型,如图7所示。较上述岩土工程反

分析所用的计算模型(见图4、图6)相比,该模型包括了坡脚下部的堆渣体(Q₄^{ml})。

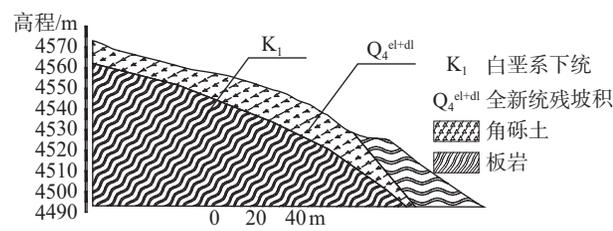


图7 弃渣场边坡1-1'工程地质剖面图

3.3.2 计算结果

稳定性计算所采用的岩土物理力学参数为表1中所列。经过对剖面的稳定性计算,正常工况下边坡稳定最小安全系数为1.062(见图8a),大于1.05,小于边坡安全控制标准1.10,表明在自然条件下,现状边坡基本稳定,这与目前现场工程地质调查的结论基本一致。在非正常工况(暴雨工况)下,边坡稳定最小安全系数为0.940(见图8b),小于1.0。图8b给出了边坡稳定性系数小于1.0的所有滑面分布(红色圆弧线条),最小稳定系数0.964对应的滑面出现在弃渣体中,表明弃渣体在暴雨工况下将会失稳破坏。潜在滑体体积为286.19 m³/m,质量为6296.1 kN/m;总下滑力2654.3 kN/m,总抗滑力2825.6 kN/m。

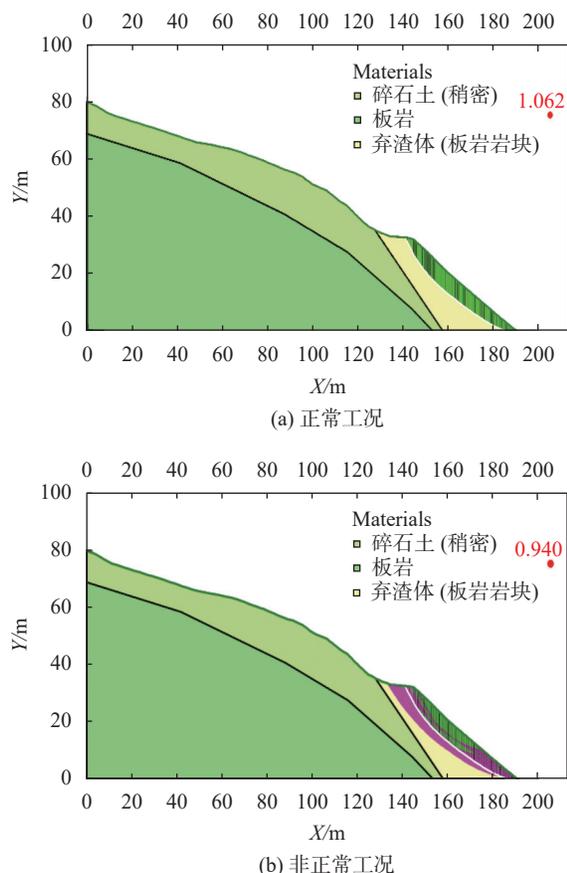


图8 弃渣场1-1'边坡稳定性计算结果图

4 堰塞可能性分析

通常形成堰塞湖有四个基本条件,分别是上游河流汇集、原有水系堵塞、河谷堵塞后流水聚集并向四周漫溢、储水量足够大。

本项目弃渣场位于山坡坡体,部分弃渣占压了原行洪通道,根据地形和地貌条件分类,属于山坡型+沟谷型弃渣场。大气降水经山坡汇水和降雨入渗补给弃渣场,经弃渣场内部向低处流动,由弃渣场坡脚处排泄。因此需要计算弃渣场上游沟谷及坡顶汇水及排泄情况,以判断弃渣场排水系统的泄洪能力及上游汇水对弃渣场的影响(见图9)。经计算,该弃渣场范围汇水面积为 17.35 km²。坡面汇水面积为 0.043 km²。目前截水沟沿弃渣场顶部设置,截流山体坡面汇水,水沟采用梯形水沟(侧壁坡率 1:1),沟下底宽 0.5 m,深 0.3 m,经计算排水流量为 1.5 m³/s,能够满足截流山体坡面汇水的要求。坡面降雨将直接由截水沟沿坡体顶面排至两侧,不会直接冲刷坡面。

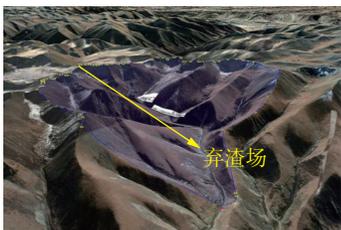


图9 弃渣场上游区域汇水面积

目前弃渣场范围形成堰塞湖的条件仅为上游有河流汇集。上游河谷内表层均被草皮覆盖,不存在易被冲刷裹挟的泥及块石,故形成堰塞湖的物源只可能是弃渣场失稳的岩土体。暴雨状态下,弃渣体可能发生失稳滑动,滑动的坡体体积为 286.19 m³/m,构成堰塞湖的物源。而完全堵塞沟谷预计方量为 496 m³/m。因此,边坡失稳后的岩土体不会完全堵塞河道并储蓄水体。此外,隧道开挖弃渣材料均为破碎板岩,粒径平均,颗粒级配较差,在雨水冲刷下被裹挟至沟底甚至对面岸坡的可能性小。沟谷内上游水流因水力坡度大,流速快,基本不可能被失稳岩土体阻塞形成堰塞湖,而是直接通过板岩粒径间的空隙向下游排泄。

综合判断,暴雨工况下若坡体发生滑动,滑体物质完全堵塞河道而形成堰塞湖的可能性较小。

5 结论

(1)该弃渣场不稳定斜坡形成的主要原因为开挖坡脚、集中堆载弃渣、未及时施作排水设施。

(2)经岩土工程反分析计算,弃渣天然重度为 22 kN/m³、黏聚力为 11 kPa、内摩擦角为 28.5°;弃渣饱

和重度为 22 kN/m³、饱和黏聚力为 9.9 kPa、饱和内摩擦角为 25.6°;碎石土的天然重度为 24 kN/m³、黏聚力为 29 kPa、内摩擦角为 30°;碎石土饱和重度为 25 kN/m³、饱和黏聚力为 26 kPa、饱和内摩擦角为 27°。

(3)稳定性计算结果表明该弃渣场边坡在在正常工况下边坡稳定最小安全系数为 1.062,处于基本稳定状态;弃渣体在非正常工况(暴雨工况)下边坡稳定最小安全系数为 0.940,处于不稳定状态。

(4)暴雨工况下,若坡体发生滑动,滑体物质完全堵塞河道而形成堰塞湖的可能性较小。

参 考 文 献

- [1] 程晓伟, 张小兵. 京新高速公路集宁至呼和浩特段 K147 滑坡分析与治理[J]. 工程勘察, 2014, 7(6): 16-21.
- [2] 邵丽霞, 王超, 李晓军. 十天高速汉中至西段高填方边坡类型及特征[J]. 工程勘察, 2014, 1(6): 25-30.
- [3] 贺鹰, 张国胜. 某边山公路工程地质环境特征及其地质灾害危险性评估[J]. 工程勘察, 2010, (S1): 812-817.
- [4] 张其唯, 马淑芝, 贾洪彪. 矿山排土场稳定性评价的 FLAC3D 方法和刚体极限平衡法对比分析[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(6): 45-48.
- [5] 柏森. 某隧道出口弃渣场边坡稳定性分析[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(4): 81-83.
- [6] 曹启增. 基于 Geo-studio 的降雨条件下隧道弃渣场边坡稳定性分析[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [7] 姜游. 重丘陵地区沟道型隧道弃渣场稳定性研究[J]. 建筑安全, 2020, (1): 32-36.
- [8] 张秋月. 某铁路弃渣场滑坡成因分析及整治方案研究[J]. 铁道勘察, 2019, 45(5): 81-85.
- [9] 梁振宁, 龚伦, 马相峰, 等. 基于强度折减法的隧道弃渣场稳定性分析[J]. 路基工程, 2019, (1): 43-46.
- [10] 肖志坚. 京台高速公路南平段某弃渣场边坡稳定性勘察及分析[J]. 福建交通科技, 2019, (3): 16-19.
- [11] 刘建彪, 杨俊毅, 杨培, 等. 山区高速公路弃渣场渣体敏感性及其分类堆置[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(10): 128-131.
- [12] 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, (9): 1884-1894.
- [13] 黄初涛, 吴勇, 王勇, 等. 位移反分析法在公路隧道围岩参数确定中的应用[J]. 人民长江, 2017, 48(S2): 138-140.
- [14] JTG/T 3334—2018 公路滑坡防治设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.