

湖北赤壁东洲大道工程边坡渐进破坏机理分析

黄波, 鲁志雄, 何英东, 卢应发

Analysis of progressive failure mechanism of engineering slope at Dongzhou Avenue, Chibi of Hubei Province

HUANG Bo, LU Zhixiong, HE Yingdong, and LU Yingfa

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于贝叶斯-粒子群算法的溜砂坡稳定性评价](#)

Stability evaluation of sand slopes based on the Bayesian-PSO algorithm

娄超华, 田荣燕, 旺久, 孙威宇, 罗进 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 53-59

[基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡稳定性分析与评价](#)

Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods

瞿婧晶, 陆燕, 吴曙亮, 刘健, 苟富刚 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 35-42

[北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析](#)

Basic characteristics and stability evaluation of dangerous rockmasses in Yanqi Town, Beijing

夏相骅, 刘德成, 李玉倩, 高雪媛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 28-34

[基于主成分层次聚类模型的采空塌陷场地稳定性评价](#)

Goaf-collapse sites stability evaluation based on principal component hierarchical clustering model

郭松, 郭广礼, 李怀展, 杨向升 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 116-121

[基于指标变权重复合云模型的岩质边坡稳定性评价初探](#)

A preliminary study on evaluation of rock slope stability based on index variable weight compound cloud model

陈忠源, 戴自航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 9-17

[基于Mein-Larson入渗模型的凹形边坡稳定性分析](#)

Stability analysis of concave slope based on Mein-Larson infiltration model

胡庆, 吴益平, 苗发盛, 张龙飞, 李麟玮 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 26-35



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205012

黄波, 鲁志雄, 何英东, 等. 湖北赤壁东洲大道工程边坡渐进破坏机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 20-28.

HUANG Bo, LU Zhixiong, HE Yingdong, *et al.* Analysis of progressive failure mechanism of engineering slope at Dongzhou Avenue, Chibi of Hubei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 20-28.

湖北赤壁东洲大道工程边坡渐进破坏机理分析

黄波¹, 鲁志雄², 何英东³, 卢应发³

(1. 湖北省地质环境总站, 湖北武汉, 430034; 2. 湖北省地质局武汉水文地质工程地质大队, 湖北武汉 430050; 3. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北武汉 430068)

摘要: 东洲大道工程边坡处于褶皱断裂复合部位, 是典型降雨和工程施工扰动引起的渐进变形破坏。本文在剖析其特殊边坡工程地质结构基础上, 并建立边坡计算水文地质模型, 提出了牵引式边坡稳定分析的部分强度折减不平衡拉力法, 其稳定性分析结果表明: 首次破坏是由于边坡开挖, 表层植被被剥落, 水沿着断层进入滑体, 从而产生了推移式破坏; 二次破坏是在首次破坏产生的临空面基础上, 致使滑体产生了牵引式的破坏模式; 且部分强度折减不平衡拉力法计算结果与现场破坏形式一致。本文在牵引式边坡不平衡拉力法计算的基础上, 建立了牵引式边坡破坏后以残余强度整体推移式控制力的算法, 并提出了相应的控制措施, 多年的控制措施运行结果表明: 该治理效果良好。

关键词: 工程边坡; 稳定评价; 破坏机理分析

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)05-0020-09

Analysis of progressive failure mechanism of engineering slope at Dongzhou Avenue, Chibi of Hubei Province

HUANG Bo¹, LU Zhixiong², HE Yingdong³, LU Yingfa³

(1. Geological Environmental Center of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430034, China;

2. Wuhan hydrogeology engineering geology brigade of Hubei Geological Bureau, Wuhan, Hubei 430050, China;

3. School of Civil Engineering and Environment, Wuhan, Hubei 430068, China)

Abstract: The engineering slope of Dongzhou Avenue is located in the complex zone with folds and fractures, which is a typical form of progressive deformation failure caused by the rainfall and engineering construction. Based on the analysis of its special slope engineering geological structure, a hydro-geological model is established in this paper, an unbalanced tension method of partial strength reduction for the pull-type slope is proposed to analyze the safety factor. The results of stability analysis show that: a thrust-type failure happen at first under the conditions, which an excavation is carried out, the water enters the sliding body along the fault, and the surface vegetation is peeled off. The second failure is based on the free surface caused by the first failure, a pull-type failure mode occurs from the middle part to the trailing edge of the sliding body, the calculated results of the unbalanced tension method of partial strength reduction are consistent with the field failure form. In this paper, based on the calculation of the traction slope unbalanced tension method, the calculation method of the overall pushing type control force with residual strength after the traction slope damage is established, and the corresponding control measures are

收稿日期: 2022-05-09; 修订日期: 2022-07-09

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41372363; 41641027); 三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC0005)

第一作者: 黄波(1975-), 男, 汉族, 湖北黄陂人, 学士, 研究方向为边坡工程。E-mail: 344761893@qq.com

通讯作者: 卢应发(1964-), 男, 汉族, 湖北应城人, 工学博士, 教授, 研究方向为岩土力学及边坡工程。E-mail: lyf77@126.com

proposed, and the operation results of the control measures for many years show that the management effect is good.

Keywords: engineering slope; stability evaluation; analysis of failure mechanism

0 引言

边坡工程是一个古老的研究课题,稳定性分析方法主要包括定性和定量分析方法。在假设滑体为刚体,整个滑面处于临界应力状态下,提出了简化 Bishop 法^[1]、Janbu 法^[2]、不平衡推力法、瑞典圆弧法、有限元强度折减法^[3-4]等。

边坡破坏机制与其所处的气象水文、地形地貌、地质构造、地层岩性、岩土体力学特征、水文地质及人类工程活动等地质环境密切相关。殷跃平等^[5-7]继承发展了地质力学“安全岛”理论,创造性地建立了以构造型式、早期识别和成灾动力学相结合的易滑地质结构防控理论,并建立了水库库区滑坡涌浪风险评估技术。秦四清等^[8-10]构建了锁固段型滑坡演化灾变模式,提出了锁固段型滑坡快解锁突发型和慢解锁渐变型两种灾变模式的临界位移准则。卢应发^[11-12]提出了推移式、牵引式和混合式滑坡的十几种渐进破坏机理和对应的控制标准,并建立了岩土体全过程本构模型。文宝萍等^[13]研究了兰州非饱和和重塑黄土的力学特性。

吴顺川等^[14]基于条分面法向力非均匀分布特征,提出了边坡稳定性评价的“双安全系数法”;卢应发等^[15-16]建立了点、面、体滑坡多参量时空稳定性评价指标和牵引式滑坡计算方法,形成了较为完整的边坡渐进破坏理论体系。当今的边坡稳定性评价方法正从临界状态向渐进破坏方向发展。

文章主要结合边坡所处的地质环境特征,特别是该处的地质构造特征,研究东洲大道工程边坡两次破坏机理、破坏模式和控制方法,再现边坡渐进破坏特征,并提出了部分强度折减不平衡拉力法和本区滑坡最终破坏控制的模式作为文章的研究重点。

1 地质环境特征

1.1 边坡破坏特征

东洲大道位于鄂南重镇赤壁城区,全长约 3.3 km,呈近东西向沿赤马河右岸,与京广铁路线相伴而行。2013 年 8 月,开始动土兴建,在龙翔山南侧马鞍颈至黄狮坂长约 520 m 地段,实施以开挖为主的路基整平工程。根据地形条件,对 K0+820~K0+940(C)进行分级削坡,按 31°、41°、47°由上而下分三级放坡并内设马道。类比当地相同地层岩性经验,削方坡面统一用钢筋

混凝土菱形格构梁锚固,格构间用植生袋覆土绿化处理,整体工程于 2014 年 1 月底竣工(图 1)。历经 2014 年雨季,C 段工程边坡出现格构梁剪切开裂、锚杆失效、覆土绿化植生袋下陷、坡脚排水沟内侧倾覆等明显边坡变形破坏迹象;近坡顶后缘、侧缘则出现拉张裂缝及落坎等地面变形迹象(图 1)。在此情况下对 C 段边坡采取了削坡减载、修筑地表排水及坡脚挡墙工程应急工作。在 2015 年仲夏削坡工程如期完成后,边坡变形活动却未按预期停止,暴雨期,二次削方工程边坡再度出现侧、后缘落坎,前端坡体鼓胀,同时伴随多点地下水涌出。但坡体变形破坏始终局限在坡脚排水沟内侧以上,表明该滑坡其前缘出口在东洲大道以上,且二次变形时,裂纹由下而上发展,表明二次变形破坏为牵引式的滑坡破坏特征(图 2)。

1.2 水文地质特征

赤壁城区属亚热带季风气候区,降雨多集中在 4—8 月间。2014 年首次削坡完工后,经历了 5 月多次暴雨,9—11 日,累计降雨 109 mm,13—14 日累计降雨 71.9 mm,超强的降雨为工程边坡的变形破坏创造了动力条件,亦即诱发因素。

该区地下水的赋存条件大致可分为碎屑岩类裂隙水与碳酸盐岩类岩溶裂隙水:碎屑岩类裂隙水,分布于蒲圻倒转向斜槽部,赋存于碎屑岩的构造裂隙和风化裂隙中,赋存厚度随碎屑岩的厚度变化而变化,东部较薄,西部较厚。地下水以降水入渗补给为主。东端入渗裂隙水受泥岩阻隔,沿向斜槽部由东向西经流,一部分在坡脚处以泉水形式排泄,泉流量小于 10 t/d;另一部分在 NNE 向断裂带(图 2)切穿向斜槽部位置,沿破碎带越流补给碳酸盐岩类岩溶裂隙水。碳酸盐岩类岩溶裂隙水,分布于蒲圻向斜南翼,含水岩组为中石炭系至中三叠系灰岩。因向斜向西倾伏,地下水除受降水补给外,主要接受东部区外岩层的经流补给。

1.3 构造特征

工程边坡所处二级构造单元为下扬子台坪,隶属大冶褶皱带所辖梁子湖凹陷区。这是一个在印支拗褶带之上,晚三叠世以来的继承性凹陷。在赤壁一带,上三叠统至侏罗系组成的褶皱比较宽缓,轴向 NEE,呈歪、垒相间的构造型式。在历次构造的影响下,使不同时期形成的地质构造遭受进一步改造,形成复杂的构造形迹。

NEE 向构造带主要由一系列复式褶皱及断裂带组

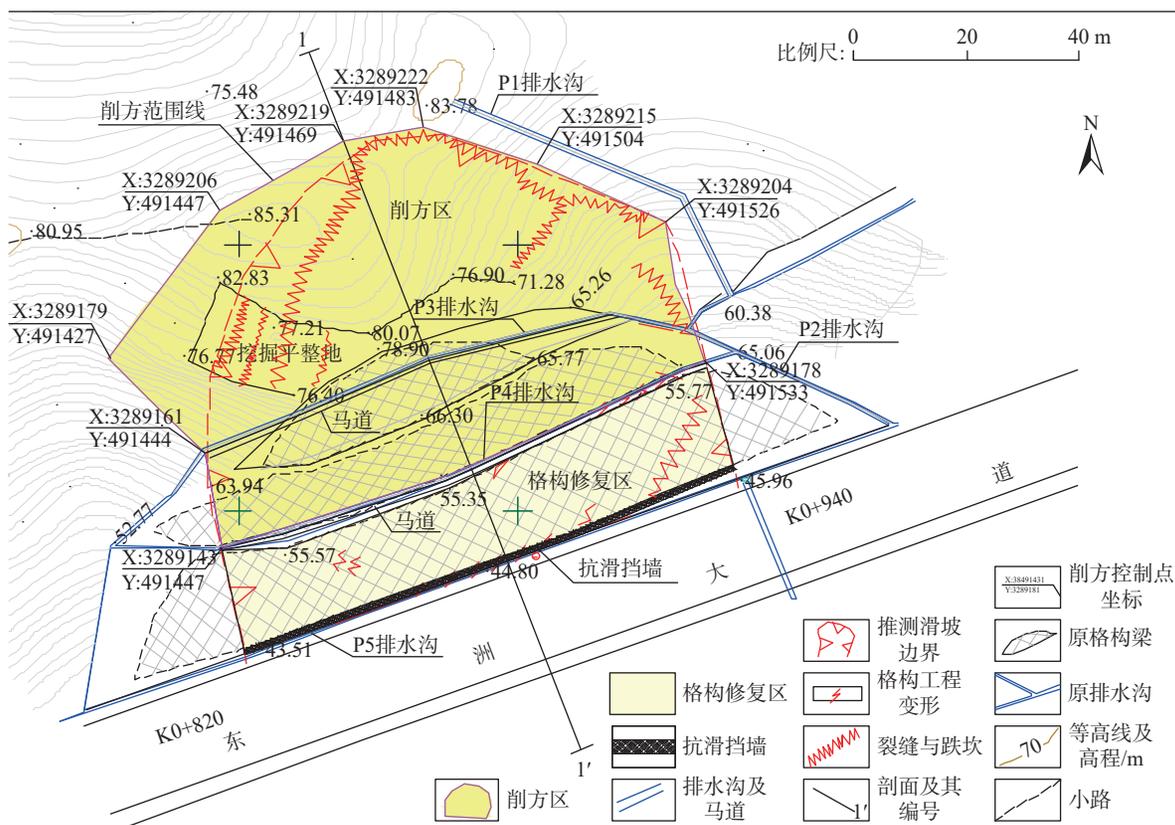


图 1 C 段边坡加固及变形特征图

Fig. 1 Reinforcement and deformation characteristics of the C segment slope

合而成,褶皱由南向北依次为:桐梓铺至五洪山倒转背斜、蒲圻倒转向斜、行将山背斜、邓家湾倒转向斜与斗门桥至望江楼倒转背斜;多组 NNE 向断裂带则表现为对早期近 EW 向构造带的切割改造,工程边坡位于蒲圻倒转向斜槽部(如图 3)。

蒲圻倒转向斜:平面上延伸约 30 km,核部地层东段为侏罗统,西部为二叠系下统,两翼地层东段为三叠、二叠统组成,西段为石炭—志留统。两翼均倾向南东,南翼倒转。北翼倾角 40°~65°,南翼倾角 35°~40°。轴线 NEE70°~80°,北段在蒲首山附近仰起。

桐梓铺五洪山倒转背斜:平面上延伸 35 km,核部地层为震旦—志留统,两翼地层依次为志留统、石炭统、二叠统。两翼均倾向 SE,北翼倒转。北翼倾角 17°~35°,南翼倾角 37°~45°。轴线平面上由 NE 50°向 NEE 80°偏转,整体由 SW 向 NE 倾伏,核部常被第四系覆盖。工程边坡地处构造剥蚀低山丘陵区,山体走向与区域构造线方向基本一致,呈近东西向。龙翔山、尖峰山横卧于赤马河南北两侧,中间为宽缓的构造盆地。北岸龙翔山制高点 125 m,南岸尖峰山海拔高程 319.1 m,宽缓盆地东高西底,标高 50~30 m,相对高差近 300 m。

河水自东向西缓慢流过,马鞍颈至黄狮嘏一带自然边坡坡度多在 50°以上,山顶呈浑圆状。

1.4 地层岩性

工程边坡及其周边出露地层主要为三叠系碳酸盐岩及碎屑岩,宽缓盆地则为大面积第四系残积物覆盖。出露地层岩性特征如下:

(1) 下三叠统大冶组(T₁d₁)

上部为鲕状灰岩灰色厚层灰岩;中部为浅黄色薄—中厚层灰岩;下部为薄层灰岩夹页岩。区内仅见上部鲕状灰岩与灰色厚层灰岩出露,分布于工作区东南部尖峰山一带。

(2) 嘉陵江组下三叠统(T₁j)

上部为灰色厚层灰岩白云岩、角砾状白云岩;中部为灰岩白云岩互层夹角砾状灰岩;下部为薄层白云岩夹灰岩。区内仅见下部薄层白云岩夹灰岩出露,分布于工作区中南部尖峰山北侧山坡。

(3) 蒲圻组中三叠统(T₂p)

主要由紫红色粉砂质页岩、粉砂岩、细砂岩组成。上部为粉砂质页岩、泥质粉砂岩为主。工作区内与下伏嘉陵江组灰岩接触处被掩盖。顶部与上覆九里岗组

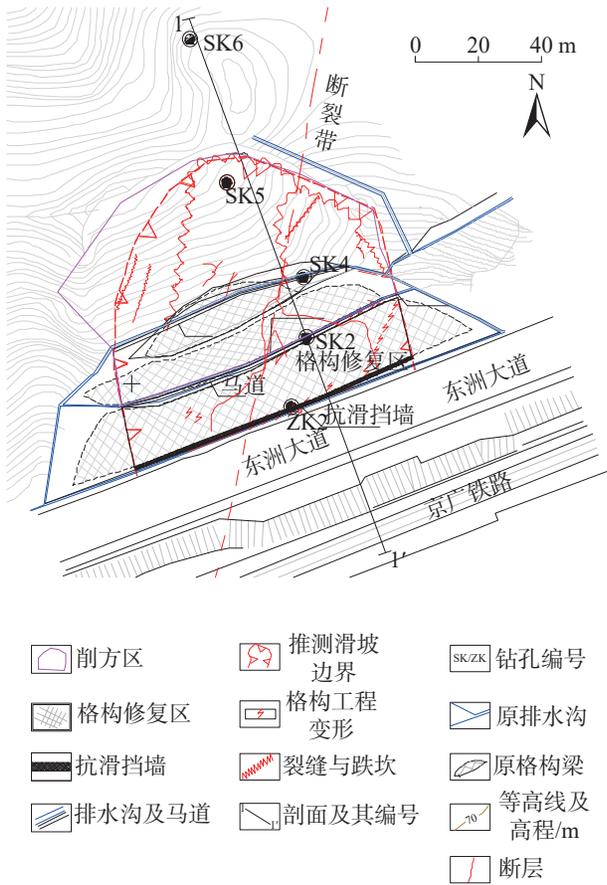


图 2 C 段边坡二次变形特征及结构特征图

Fig. 2 The second deformation and structure characteristics

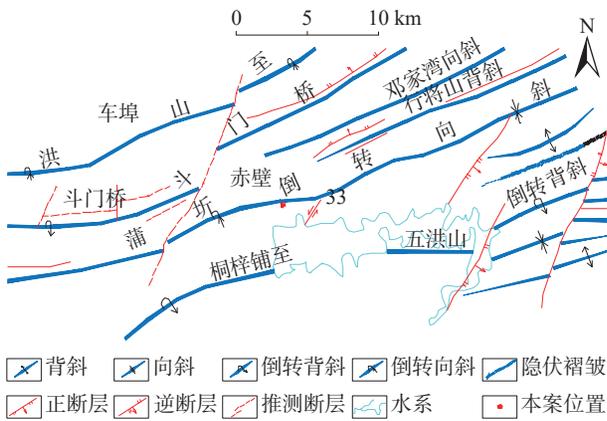


图 3 区域地质构造纲要图

Fig. 3 Geological structure in working area

灰绿色细砂岩、页岩呈平行不整合接触。分布于龙翔山南侧坡脚黄狮畈及北侧坡脚饶山徐家一带。

(4) 上三叠统九里岗组(T_3jg)

黄灰、深灰色粉砂岩、砂质页岩、泥岩为主,夹长石石英砂岩及碳质页岩,含煤层或煤线 3~7 层。顶界以紫色页岩、粉砂岩与王龙滩组长石石英砂岩分界。分布于龙翔山山脊一带,构成浑圆状山丘。

(5) 王龙滩组 T_3j_1w

以长石石英砂岩为主,夹粉砂岩、碳质页岩、间夹黏土岩、煤线或煤层,与下伏九里岗组粉砂岩呈整合接触,黄狮畈西侧平行不整合于蒲圻组紫红色粉砂岩之上。分布于龙翔山南侧山坡大部分地段,构成黄狮畈至马鞍颈一带边坡主体。

2 变形破坏机理分析

2.1 岩体类型与特征

根据地面调查,结合钻探揭露,构成工程边坡的岩体可划分如下:

(1) 较坚硬中厚层状长石石英砂岩夹薄层状粉砂岩组,代号 $[T_3j_1w]①$ 。弱风化、较难击碎;近断裂带岩体受构造影响、裂隙发育、岩体破碎。厚度约 6 m。

(2) 较软薄层状泥岩夹薄层状粉砂岩组,代号 $[T_3jg]②$ 。顶部为较软薄层紫红色页岩。厚度约 16 m,中等风化,裂隙发育,岩体破碎。

(3) 软弱薄层状碳质页岩夹煤层岩组,共有三层,代号 $[T_3jg]③$ 、 $[T_3jg]⑤$ 、 $[T_3jg]⑦$ 。厚度 1.2~1.7 m,强风化,饱水后呈软塑状;单轴极限抗压强度 4.30~5.94 MPa;

(4) 较软薄层状泥岩与泥质粉砂岩互层岩组,代号 $[T_3jg]④$ 。厚度约 12 m,强风化,裂隙发育;单轴极限抗压强度 14.1 MPa。

(5) 较软薄层状泥岩夹较坚硬泥质粉砂岩组,代号 $[T_3jg]⑥$ 。厚度约 7.2 m,中等风化,裂隙较发育。

(6) 较坚硬薄层状泥质粉砂岩组,代号 $[T_3jg]⑧$ 。厚度约 13.2 m,中等风化,裂隙较发育。

(7) 较坚硬薄—中厚层状粉砂质页岩、泥质粉砂岩组,代号 $[T_2p]⑨$ 。厚度大于 30 m,中等风化,裂隙较发育。

(8) 松散残坡积粉质黏土、碎石土,代号 $[Q^{el+dl}]⑩$,力学强度因碎石成份及含量不同而变化较大。

受褶皱及断层影响,组成边坡的①②④岩体节理裂隙十分发育。

根据结构面的类型、发育密度、结合程度及岩体结构,构成边坡的岩体完整程度可划分为破碎和极破碎类(图 4)。

2.2 平面分布特征

斜坡体岩土体平面分布为: $[T_3j_1w]$ 长石石英砂岩夹薄层状粉砂岩组构成向斜槽部, $[T_3jg]$ 、 $[T_2p]$ 构成向斜两翼。断层 Ft 呈 NNE 走向,倾向 SE,倾角 $68^\circ \sim 72^\circ$;断层两侧,受构造压扭应力作用,岩体极破碎,破碎带影

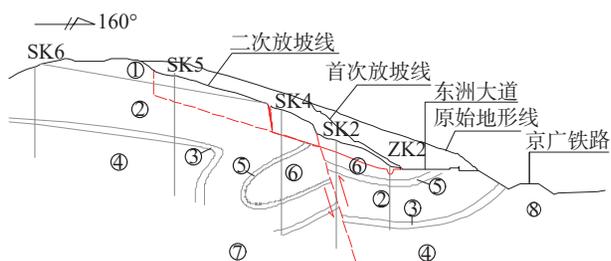


图 4 工程边坡剖面岩体类型与特征图

Fig. 4 Sketch map of engineering slope profile

注: 图例见正文

响宽度约 25 m, 断层面光滑平直, 可见摩擦镜面及擦痕。以断层为界, 东、西两侧岩土体存在显著差异:

断层东侧, 坡顶表层为少量残坡积粉质黏土夹碎石, 粉质黏土夹碎石黄褐色为主, 结构松散, 孔隙发育, 碎石分布不均; 坡面至坡脚近断层面 20 m 范围, 较软岩组受构造影响, 呈极软极破碎—破碎散体状, 属强风

化。随着远离断层面, 逐渐过渡为较破碎、薄层状结构;

断层西侧, 坡顶以中厚层状长石石英砂岩为主, 节理裂隙十分发育; 坡面至坡脚, 由泥岩夹粉砂岩、泥质粉砂岩及碳质页岩夹煤层等共同构成。近断层面为岩体破碎带, 宽约 5 m(图 2)。

2.3 剖面结构特征

从边坡破坏后岩土体分布及钻孔揭示, 工程边坡由残缺倒转向斜槽部构成。断层下盘为倒转向斜北翼, 由 [T₃jg] 及 [T₃j₁w] 构成, 地层倾向近正南, 倾角 20°左右, 在坡顶一带构成顺向结构边坡。接近断层带, 地层产状逐渐转折翘起, 由原来的倾向正南, 过渡为正北, 在近坡脚一带构成逆向结构边坡。

断层上盘为倒转向斜槽部转折端, 由 [T₃jg] 构成, 向斜南翼地层已剥蚀殆尽。转折端地层倾向近正北, 倾角 37°~40°。近断层面岩体呈极破碎散体状(图 5)。

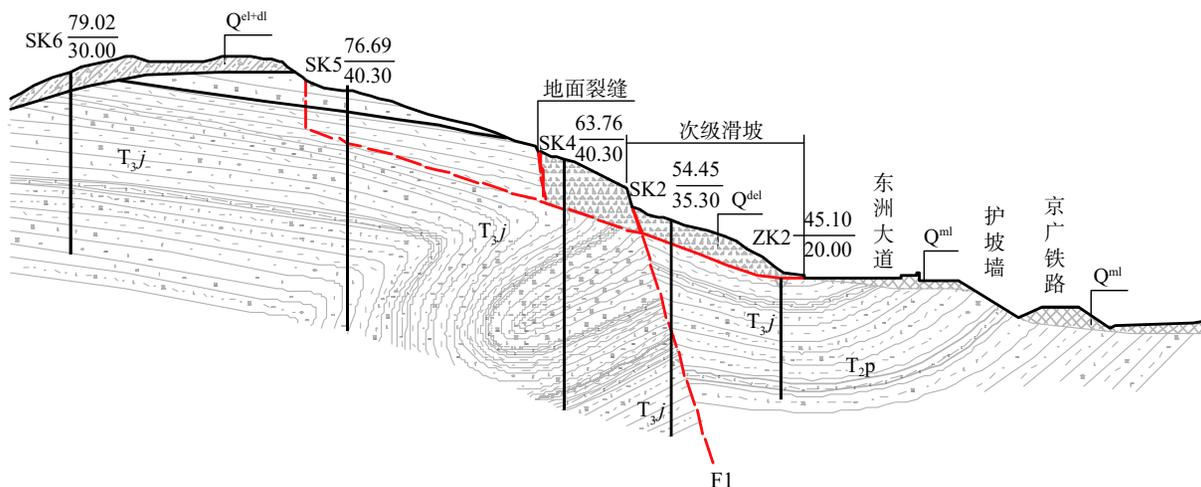


图 5 工程边坡剖面结构特征

Fig. 5 Structural characteristics of engineering slope profile

3 稳定性分析

本次稳定性分析采用不平衡推力法, 为了描述边坡破坏的渐进破坏过程, 利用文献^[11-12, 15-16]提出的部分强度折减法和牵引式滑坡稳定性评价方法, 其基本理论如下:

3.1 不平衡推力法

不平衡推力法由中国学者提出, 基本理论如下:

3.1.1 传统不平衡推力法简介

传统不平衡推力法广泛地应用于工程实践, 介绍如下。

基本假设:

- ①条块为不产生变形的刚体, 并以垂直方向一定间隔划分;
- ②后面条块作用力平行于其底边, 并作用于前面条块的重心;
- ③忽略条块转动和两条块间剪力;
- ④沿滑面的条块底边均处于临界剪应力状态。

基于上述假设, 边坡条块划分见图 6。方程如式(1)~(9)。

第 *i* 条块的正压力 *N_i* 为:

$$N_i = \beta_i l_i \cos \alpha_i \cos \alpha_i + \Delta_i l_i \cos \alpha_i \sin \alpha_i + W_i \cos \alpha_i + P_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (1)$$

压应力 $\sigma_{i,n}$ 为:

$$\sigma_{i,n} = N_i / l_i \tag{2}$$

峰值抗滑应力 $\tau_{i,peak}$ 为:

$$\tau_{i,peak} = c_i + \sigma_{i,n} \tan \varphi_i \tag{3}$$

峰值抗滑力 T_i^{crit} 为:

$$T_i^{crit} = c_i l_i + N_i \tan \varphi_i \tag{4}$$

折减应力 $\tau_{i,f}$ 为:

$$\tau_{i,f} = (c_i + \sigma_{i,n} \tan \varphi_i) / f \tag{5}$$

折减后的抗滑力 $T_{i,F}^{crit}$ 为:

$$T_{i,F}^{crit} = T_i^{crit} / f \tag{6}$$

下滑力 P_i^S 为:

$$P_i^S = \beta_i l_i \cos \alpha_i \sin \alpha_i + \Delta_i l_i \cos \alpha_i \cos \alpha_i + W_i \sin \alpha_i + P_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tag{7}$$

驱动剪应力 τ_i^a 为:

$$\tau_i^a = P_i^S / l_i \tag{8}$$

不平衡推力 P_i 为:

$$P_i = P_i^S - T_{i,F}^{crit} \tag{9}$$

式中: W_i ——第 i 条块重量;

β_i ——地表竖向;

Δ_i ——水平向均布荷载;

l_i ——底边长度;

α_i ——底边与水平夹角;

c_i ——底边黏聚力;

φ_i ——摩擦角;

$\sigma_{i,n}$ ——法向应力;

f ——滑体折减系数。

征,部分强度折减法介绍如下:

3.1.2 部分强度折减法

针对一般性的边坡,按不平衡推力法进行条块划分见图6,常见的计算是:将1~ n 条块一起考虑在式(1)~(9)之中,从而计算获得该边坡的稳定系数,计算实质为最后一个条块的下滑力等于临界摩阻力(亦即:最后一个条块处于临界状态),现将部分强度折减法说明如下:

部分强度折减法实施步骤为:先取1~ m 条块,按式(1)~(9)计算,且计算稳定系数等于1,则此时的条块为临界状态条块,如获得该条块为第 m 条块,再分别实施从第1至 $m+1$ 条块、...、第1至 n 条块的稳定性计算,从而获得不同的部分强度折减系数(即:稳定系数)($f_i, i \in (m, n)$),该计算的物理意义为:临界状态点从第 m 条块一点一点向前移动至第 $m+1$ 、...、第 n 条块,到达第 n 条块时为传统计算获得的边坡整体稳定系数,从计算结果可知:随临界状态向前一点一点移动,稳定系数越来越大,这与现场和人们的理性分析不符,定义不同临界状态条块边坡的部分强度折减富余稳定系数(f_{zs}^i)为:边坡的强度折减整体稳定系数(f_n)与第 i 临界状态条块的强度折减稳定系数(f_i)之差(见式(10))。

$$f_{zs}^i = f_n - f_i \tag{10}$$

从式(10)可知,当临界状态处于第 n 条块时,边坡此时整体处于破坏状态,此时的富余强度折减系数为零($f_{zs}^i = 0$)。至此文章介绍了适合于推移式边坡的分析和计算,然而工程中很多边坡以牵引式的方式而发生破坏,基于该特点文章介绍一种牵引式边坡的计算方法。

3.2 部分强度折减不平衡拉力法

从不平衡推力法的命名可知,该方法适宜于推移式边坡计算,然而东洲大道工程边坡两次的变形破坏特征可知,首次破坏是在雨水作用下以推移式的方式而发生局部破坏,第二次破坏是在滑坡前缘破坏的基础上,从而引发裂纹从前缘向后缘逐渐发展的牵引式破坏。利用描述推移式和牵引式边坡的渐进破坏条块理论,对该边坡二次破坏特征进行分析;提出牵引式边坡部分强度折减不平衡拉力法的计算方法为:其基本假设和不平衡推力法相同,条块划分也一样,但条块编号相反,前缘初始条块为第一条块,后缘最后条块为第 n 条块,其计算式与第(1)~(9)式一致,但条块与条块之间的推力定义为拉力,表示方法与不平衡推力法一样,采用部分强度折减条块之间的拉力达到其岩土体对应的强度要求时,岩土体发生破坏,此时破坏条块拉力为零;余下条块

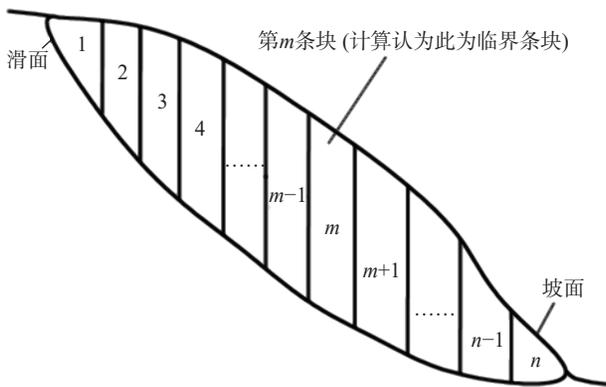


图6 边坡不平衡推力法条块划分图

Fig. 6 The scheme of slice block of unbalance thrust method

工程应用时,利用式(1)~(9),采用多次迭代计算,获取折减系数(亦即:稳定系数) f 。在实践工程中,由于边坡破坏是渐进破坏过程,为了描述这种渐进破坏特

继续按照部分强度折减进行。

3.3 推移式和牵引式计算分析

东洲大道工程边坡发生了两次变形破坏,首先是在降雨的作用下,水沿着断层聚集,在水的推力作用下发生了推移式破坏,这种破坏定义为局部破坏(图 7)。针对该局部破坏滑体,通过室内试验,滑体和滑面各参数为:滑体抗压强度为 238 kPa,滑体重度取 24 kN/m³,滑面饱和岩土参数取值为:黏聚力 $c=22$ kPa,摩擦角 $\varphi=13^\circ$,该局部边坡在饱水条件下,稳定系数等于 0.842 时,各条块的下滑力、摩阻力和剩余推力等见表 1。从表 1 可知,剩余推力随着条块数量的增加逐渐下降,表明 Ft 断层聚集的水压力是局部破坏的主要诱因,是引起该边坡局部发生推移式破坏的重要因素。

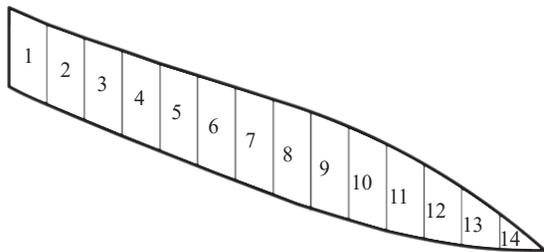


图 7 边坡局部推移式破坏条块计算图

Fig. 7 Calculation layout of local thrust-type failure

表 1 推移式局部破坏计算结果

Table 1 Calculation results of push-type local failure

条块序号	条块底边长 /m	条块底边角 /($^\circ$)	下滑力 /kN	摩阻力 /kN	剩余下拉力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
1	3.67	57.01	98.14	79.65	61.1
2	2.10	17.98	77.51	67.65	26.1
3	2.10	17.98	69.61	65.54	13.9
4	2.15	21.78	71.55	66.37	20.6
5	2.16	22.44	73.93	67.37	26.6
6	2.14	21.11	76.53	68.75	30.8
7	2.13	20.13	78.22	70.53	32.8
8	2.11	18.53	80.18	71.37	38.9
9	2.07	15.42	78.05	70.93	37.6
10	2.07	15.42	75.53	69.24	39.0
11	2.03	10.44	71.82	66.89	31.3
12	2.02	8.98	66.12	62.60	23.3
13	2.00	3.51	58.88	57.06	9.8
14	2.00	1.08	49.13	49.13	-0.1

在上述破坏的基础上,断层聚集的水份继续向下渗透,从而引起第 9 至第 1 条块的推移式破坏(图 8);而第 9、10 块在采用牵引式滑坡计算时,在第 10 条块的牵引力为 91.01 kN/m,对应的拉应力为 10.91 kPa,该拉应力使滑体在第 10 条块发生了牵引式破坏(注:当发生牵引破坏后,下一条块没有来自前面条块的剩余拉力);在强度折减系数等于 1 的情况下,继续采用牵引式计算方

法,紧接着该滑坡在第 15 和 28 条块的牵引力分别为 88.55 kN/m 和 60.30 kN/m,对应的拉应力为:11.2 kPa 和 12.3 kPa,其对应的拉应力约为滑体抗压强度的二十分之一,该拉应力致使滑体发生拉破坏。其计算结果与现场基本吻合,表明牵引式滑体计算理论可基本描述滑坡的渐进破坏特征(图 8、表 2)。

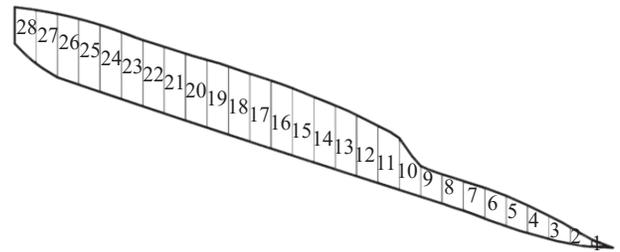


图 8 边坡牵引式破坏条块计算图

Fig. 8 Calculation layout of local pull-type failure of slope

表 2 边坡牵引式破坏计算结果

Table 2 Calculation results of slope traction failure

条块序号	条块底边长 /m	条块底边角 /($^\circ$)	下滑力 /kN	摩阻力 /kN	剩余下拉力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
1	3.00	2.29	93.99	92.99	1.00
2	3.01	5.53	103.00	98.29	4.71
3	3.06	11.22	122.53	114.31	8.21
4	3.09	13.63	147.50	134.10	13.40
5	3.13	16.70	161.08	143.11	27.96
6	3.14	17.13	165.10	143.86	31.24
7	3.18	19.35	167.15	141.34	45.81
8	3.23	21.61	169.34	138.30	51.04
9	3.29	24.26	169.25	133.60	75.65
10	3.13	16.47	196.26	156.25	91.01
11	3.13	16.57	151.50	186.42	0.00
12	3.13	16.67	215.67	195.01	20.65
13	3.13	16.77	245.50	203.59	41.91
14	3.14	16.88	264.63	205.31	59.32
15	3.14	16.97	290.57	210.02	88.55
16	3.14	17.08	195.99	216.29	0.00
17	3.14	17.18	223.42	215.53	7.89
18	3.14	17.29	232.53	215.58	12.96
19	3.14	17.39	238.67	215.23	16.45
20	3.15	17.49	244.47	213.51	20.95
21	3.15	17.60	250.86	212.71	22.15
22	3.15	17.70	257.45	212.09	25.36
23	3.15	17.80	266.56	212.58	28.98
24	3.15	17.90	274.46	213.95	30.51
25	3.15	17.99	280.96	212.87	38.10
26	3.16	18.13	284.68	209.18	45.50
27	3.16	18.46	285.97	202.83	53.15
28	8.60	78.86	288.19	197.88	60.30

3.4 整体破坏分析

从 3.3 分析可知,该边坡首先在中部发生破坏,紧接着发生以下部推移式和中上部为牵引式的破坏形式;在牵引式破坏过程中,其牵引力不大(最大为 91.01 kN/m),

该计算所得牵引力能否作为设计依据?在边坡在变形破坏过程中,无论是牵引式还是推移式破坏的边坡,其最终均处于破坏后区状态,针对该边坡,在牵引式边坡发生破坏后,其牵引式边坡的滑面参数处于残余应力状态,且向前部推移式边坡移动,使其整体转化为推移式边坡的破坏模式,且整体滑面处于残余应力状态,根据室内试验,其残余凝聚力 $c=2$ kPa,摩擦角 $\varphi=8^\circ$,按照该力学参数,取设计安全系数 1.25,其饱和状态下计算见图 9 和结果见表 3。

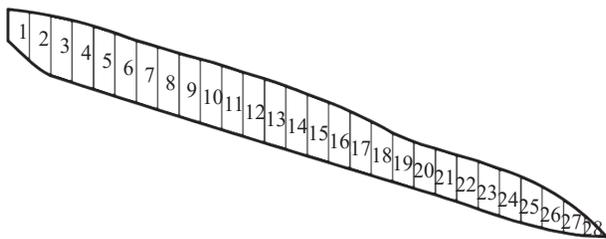


图 9 边坡整体稳定分析图

Fig. 9 Layout of entire stability analysis

表 3 边坡整体稳定性计算结果

Table 3 Calculation results of the overall stability of the slope

条块序号	条块底边长 /m	条块底边角 /($^\circ$)	下滑力 /kN	摩阻力 /kN	剩余下滑力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
1	3.00	2.29	93.99	92.99	106.1
2	3.01	5.53	103.00	98.29	385.2
3	3.06	11.22	122.53	114.31	443.6
4	3.09	13.63	147.50	134.10	293.9
5	3.13	16.70	161.08	143.11	309.7
6	3.14	17.13	165.10	143.86	318.3
7	3.18	19.35	167.15	141.34	291.9
8	3.23	21.61	169.34	138.30	302.0
9	3.29	24.26	169.25	133.60	288.8
10	3.13	16.47	196.26	156.25	292.8
11	3.13	16.57	151.50	186.42	305.1
12	3.13	16.67	215.67	195.01	294.3
13	3.13	16.77	245.50	203.59	296.9
14	3.14	16.88	264.63	205.31	325.0
15	3.14	16.97	290.57	210.02	292.1
16	3.14	17.08	195.99	216.29	307.6
17	3.14	17.18	223.42	215.53	298.0
18	3.14	17.29	232.53	215.58	266.3
19	3.14	17.39	238.67	215.23	300.2
20	3.15	17.49	244.47	213.51	220.5
21	3.15	17.60	250.86	212.71	223.0
22	3.15	17.70	257.45	212.09	241.5
23	3.15	17.80	266.56	212.58	250.6
24	3.15	17.90	274.46	213.95	231.1
25	3.15	17.99	280.96	212.87	219.8
26	3.16	18.13	284.68	209.18	191.3
27	3.16	18.46	285.97	202.83	132.5
28	8.60	78.86	288.19	197.88	47.4

由于该边坡厚度不大,根据现场特征,在第 24 号条块施加抗滑桩,计算所需的抗滑力不大,仅为 231.1 kN/m,

因采用小型抗滑桩(1.2 m \times 1.5 m),桩深 14 m,嵌岩深度是桩深的三分之一,该抗滑措施布设后,经 7 年运行,效果好。

4 结论与建议

通过对东洲大道工程边坡的两次变形破坏特征分析表明:

(1)地形地貌、岩层走向和倾向、构造特征、岩土体基本特征等是控制边坡破坏的主要因素,降雨是诱发该边坡是否发生破坏的外部因子;东洲大道工程边坡由于特殊的构造特征,致使断层面附近岩体呈极破碎散体状,在降雨作用下,雨水随断层聚集,推动边坡发生压剪破坏,由于边坡下部临空面的出现,致使边坡由中部往上部发生牵引式破坏。

(2)将现行不平衡推力法加以改进,提出了牵引式边坡的不平衡部分强度折减拉力法,计算结果表明,当条块间拉应力大于岩土体抗压强度二十分之一时,滑体发生拉破坏,且这种拉破坏由中部向上部呈阶段式发展。计算结果很好解释牵引式边坡破坏特征。

(3)针对牵引式边坡的破坏特征(边坡厚度小、牵引力不大等),提出了牵引式和推移式组成的边坡应按残余强度以整体推移式滑体形式计算其控制抗滑力,亦即按残余强度条件下的推移式整体边坡的剩余下滑力决定控制设计力的取值;该边坡的多年实践经验表明:该设计取值方法是正确的。

参考文献(References):

- [1] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes [J]. *Geotechnique*, 1955, 5(1): 7-17.
- [2] Janbu. Slope stability computations; In *Embankment-dam Engineering. Textbook*. Eds. R.C. Hirschfeld and S.J. Poulos. JOHN WILEY AND SONS INC., PUB., NY, 1973, 40P [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1975, 12(4).
- [3] KELESOGLU M K. The evaluation of three-dimensional effects on slope stability by the strength reduction method [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(1): 229-242.
- [4] NIAN T K, HUANG R Q, WAN S, et al. Three-dimensional strength-reduction finite element analysis of slopes: Geometric effects [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(5): 574-588.
- [5] 殷跃平,王文沛,张楠,等.强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例 [J]. *中国地质*, 2017, 44(5): 827-841. [YIN Yueping, WANG Wenpei, ZHANG Nan, et al. Long runout geological disaster initiated by

- the ridge-top rockslide in a strong earthquake area: A case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province [J]. *Geology in China*, 2017, 44(5): 827 – 841. (in Chinese with English abstract)
- [6] 殷跃平, 朱赛楠, 李滨. 青藏高原高位远程地质灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2021. [YIN Yueping, ZHU Sainan, LI Bin. High-level remote geological disasters in Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)]
- [7] 黄波林, 殷跃平. 水库区滑坡涌浪风险评估技术研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 621 – 629. [HUANG Bolin, YIN Yueping. Risk assessment research on impulse wave generated by landslide in reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 621 – 629. (in Chinese with English abstract)]
- [8] CHEN H R, QIN S Q, XUE L, et al. A physical model predicting instability of rock slopes with locked segments along a potential slip surface [J]. *Engineering Geology*, 2018, 242: 34 – 43.
- [9] XUE L, QIN S Q, PAN X H, et al. A possible explanation of the stair-step brittle deformation evolutionary pattern of a rockslide [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2017, 8(2): 1456 – 1476.
- [10] 杨百存, 秦四清, 薛雷, 等. 锁固段损伤过程中的能量转化与分配原理 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(7): 975 – 981. [YANG Baicun, QIN Siqing, XUE Lei, et al. Energy Conversion and Allocation Principle During the Damage Process of Locked Segment [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(7): 975 – 981. (in Chinese with English abstract)]
- [11] LU Y F. Deformation and failure mechanism of slope in three dimensions [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(2): 109 – 119.
- [12] 卢应发. 一种新的本构模型及参数标定 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(8): 2138 – 2144. [LU Yingfa. A new constitutive model and its parameter calibration [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(8): 2138 – 2144. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 闫亚景, 文宝萍, 黄志全. 可溶盐对兰州非饱和重塑黄土抗剪强度的影响 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(10): 2881 – 2887. [YAN Yajing, WEN Baoping, HUANG Zhiquan. Effect of soluble salts on shear strength of unsaturated remoulded loess in Lanzhou City [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(10): 2881 – 2887. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 吴顺川, 韩龙强, 李志鹏, 等. 基于滑面应力状态的边坡安全系数确定方法探讨 [J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(4): 719 – 726. [WU Shunchuan, HAN Longqiang, LI Zhipeng, et al. Discussion on the methods for determining slope safety factor based on stress state of the sliding surface [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(4): 719 – 726. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 卢应发, 黄学斌, 刘德富. 边坡力的分布特征和稳定性分析 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(7): 1321 – 1329. [LU Yingfa, HUANG Xuebin, LIU Defu. Distribution characteristics of force and stability analysis of slope [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(7): 1321 – 1329. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 卢应发, 刘德富, 石峻峰. 基于牵引式斜坡变形破坏机理的稳定性分析和预测预警方法: 中国, CN103942446B [P]. 2017-02-22. [LU Yingfa, LIU Defu, SHI Junfeng. Stability analysis and prediction and early warning method based on the deformation failure mechanism of traction slope: China, CN103942446B [P]. 2017-02-22. (in Chinese)]