

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.013

引用格式:邹敏,尹平保,贺炜.交通荷载下镍铁渣-黏土路基动力响应特性分析[J].公路与汽运,2024,40(6):71-75+80.

Citation: ZOU Min, YIN Pingbao, HE Wei. Analysis of characterization of dynamic response of nickel-iron slag-clay roadbed under traffic loading[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(6): 71-75+80.

交通荷载下镍铁渣-黏土路基动力响应特性分析*

邹敏^{1,2}, 尹平保^{1,2}, 贺炜^{1,2}

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;

2.长沙理工大学 特殊环境道路工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:为研究镍铁渣-黏土路基在交通荷载下的动力响应特性,利用有限元软件建立路基模型,采用半正弦波荷载模拟交通荷载,分析镍铁渣-黏土填料、车辆速度和交通荷载对镍铁渣-黏土路基动力响应特性的影响,确定镍铁渣-黏土路基填料的最佳配比。结果表明,在路基同一深度处,交通荷载对车轮作用点的影响最大,随车轮作用点距离的增大,交通荷载作用逐渐降低;交通荷载作用下,路基的动应力和变形均随车辆速度和交通荷载的增大而增大,随路基深度的增加而减小;黏土35%+镍铁渣65%为最佳路基填料。

关键词:公路;路基;镍铁渣;黏土;交通荷载;动力响应

中图分类号:U418.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)06-0071-05

随着交通的发展,车辆增多,车辆速度加快,车辆载质量增大。交通荷载作用下,路基土体常出现变形和不均匀沉降,致使道路发生不可恢复性破坏^[1]。因此,研究路基在交通荷载作用下的动力特性具有重要意义。目前对路基在交通荷载作用下的变形进行了理论计算、试验研究和数值模拟计算,如张幸幸等基于等价黏弹塑性模型理论,提出了交通荷载下路基沉降计算方法^[2];刘维正等根据力学-经验法,建立了软土路基在交通荷载下的沉降预测模型^[3];耿大新等依据相似理论建立路基模型,分析了加载幅值和频率对路基动力性能的影响^[4];石熊通过足尺模型试验,建立了长期荷载下路基变形指数模型^[5]。受限于研究条件、技术和成本等,现场试验难以大规模进行,而基于现场试验结果的数值计算可较好地模拟实际情况。

在路基动力响应特性数值分析方面,Feng S.等利用ABAQUS软件建立软土路基模型,研究了潮汐荷载和交通荷载多因素耦合对路基沉降的影响^[6];Xu F.等建立三维列车-轨道-路基相互作用模型,得到了动应力随路基深度的变化规律^[7];罗烈日等分析了交通荷载振幅、频率和行车间隔时间对路

基变形的影响^[8];刘飞禹等建立路堤三维动力流固耦合模型,分析了桩间距、路堤高度和桩体模量等对路面沉降的影响^[9];Gao X. H.等通过对填方路基进行数值模拟分析,发现路基施工期沉降比运营期大^[10]。以上研究主要针对软土、黄土等路基进行数值模拟计算,对镍铁渣路基动力响应特性的数值分析甚少。鉴于此,本文利用ABAQUS有限元软件建立镍铁渣-黏土路基模型,采用半正弦波荷载模拟交通荷载,分析不同镍铁渣-黏土填料、车辆行驶速度和交通荷载对镍铁渣-黏土路基应力、变形的影响。

1 交通荷载的模拟

文献[11]的研究表明,可采用半正弦波荷载模拟交通荷载。如图1所示,单个波形曲线代表交通

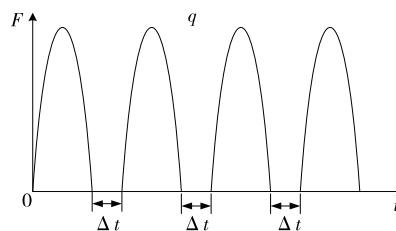


图1 半正弦波荷载示意图

* 基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50647);长沙理工大学特殊环境道路工程湖南省重点实验室开放基金项目(kfj180502)

荷载作用一次, Δt 表示上台车辆与下台车辆之间间隔的时间。

交通荷载的作用形式可用下式表示:

$$F(t) = p + q(t) \quad (1)$$

式中: p 为静荷载, 其值为车轮胎压; $q(t)$ 为动荷载。

$q(t)$ 可表示为:

$$q(t) = q_{\max} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{T} \right) \quad (2)$$

$$T = \frac{12L}{v} \quad (3)$$

式中: $q_{\max}$ 为动荷载, 一般不超过汽车静载的 0.3 倍; T 为荷载作用周期; L 为轮胎接触面的半径, 一般取 15 cm; v 为车辆速度。

单个周期时间内的荷载作用表达式为:

$$q(t) = q_{\max} \sin^2 \left(\frac{\pi t}{T} \right) \quad (4)$$

取 $q_{\max} = 0.3p$, 联立式(1)和式(4), 得到半正弦波荷载值表达式:

$$F(t) = p + 0.3p \sin^2 \left(\frac{\pi t}{T} \right) \quad (5)$$

式(5)考虑了车辆载质量、路面状况和车辆速度等因素, 可较好地模拟交通荷载。

根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》^[12], 荷载采用标准轴载 100 kN, 车轮距离为 2 m, 单轮轴载为 25 kN, 胎压为 0.7 MPa, 单轮着地当量圆直径为 21.3 cm, 接触面积为 0.071 4 m²。为方便计算, 采用长度 0.24 m×宽度 0.30 m 的矩形, 以均布荷载形式施加在矩形内^[13]。

2 基本假定与模型验证

2.1 基本假定

为便于数值模拟分析, 作如下基本假设: 1) 交通荷载作用下路面结构材料均匀、连续, 且为各向同性的线弹性体; 2) 路基土体受力后发生的变形在弹塑性小变形之内; 3) 路面、路基等结构层之间变形连续, 且不产生相对滑移与分离; 4) 交通荷载作用过程中, 土体和路面的各项参数均不发生改变。

车辆行驶过程中, 车轮作用时间很短, 为 0.01~0.10 s, 采用有限元软件中动力显示分析模块进行数值计算^[14]。鉴于道路结构中路面材料质量高、刚度大等特点, 在进行数值计算时, 对路面结构采用线弹性本构模型, 对路基及以下部分采用弹塑性本构关系^[15], 其中弹性部分采用弹性模型定义参数, 塑性部分采用摩尔-库伦模型计算。

2.2 模型验证

为验证数值分析模型及参数取值的合理性, 以文献[16-17]中镍铁渣加筋路基现场试验为例, 结合文献[18-19]中镍铁渣-黏土的参数取值建立相应计算模型。

如图 2 所示, 镍铁渣-黏土路基模型共分为 7 层, 从上至下依次为 15 cm 厚沥青混凝土面层、35 cm 厚水泥稳定碎石基层、20 cm 厚水泥稳定碎石底基层、500 cm 厚镍铁渣-黏土路基、160 cm 厚淤泥质土、300 cm 厚粉质黏土和 670 cm 厚残积砂质黏性土土基。路面宽度为 22 m, 路基底部宽度为 32 m, 边坡坡度为 1:1。在 500 cm 厚镍铁渣-黏土路基处每隔 50 cm 在路基两侧采用土工格栅包边, 包边宽度为 3 m, 土工格栅的刚度为 40 kN/m, 屈服力为 8 kN/m。路面结构和路基结构材料计算参数分别见表 1、表 2。

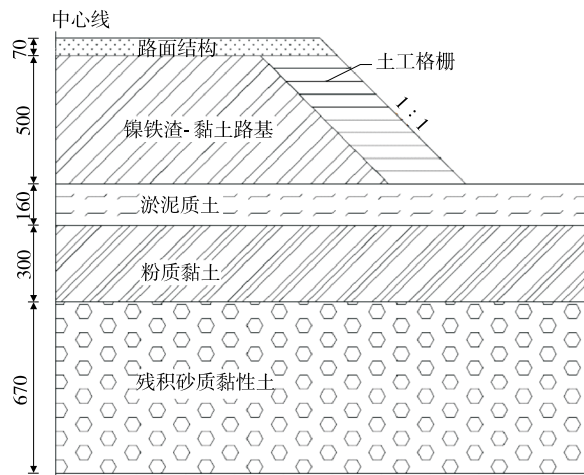


图 2 镍铁渣-黏土路基横断面示意图 (单位: cm)

表 1 路面结构模型计算参数

路面结构	路面材料	厚度/cm	弹性模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
面层	沥青混凝土	15	1 500	1 900	0.35	330	30
基层	水泥稳定碎石	35	1 400	2 000	0.20	420	60
底基层	水泥稳定碎石	20	1 300	1 900	0.20	350	55

表 2 路基结构模型计算参数

路基材料	厚度/cm	弹性模量/MPa	重度/(g·cm ⁻³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
黏土 30%+镍铁渣 70%	500	70.0	19.9	0.21	31.0	39
黏土 35%+镍铁渣 65%	500	125.0	21.8	0.30	45.0	40
黏土 40%+镍铁渣 60%	500	100.0	20.5	0.35	52.0	39
淤泥质土	160	1.5	17.1	0.45	14.8	6
粉质黏土	300	22.0	18.5	0.30	23.0	16
残积砂质黏性土	670	35.0	18.5	0.25	23.0	23

表 3 为数值模拟分析得到的沉降值与实测值对比。由表 3 可知:数值模拟沉降值与实测值相差较小,表明模拟结果较好,模型和参数取值合理。

表 3 镍铁渣-黏土路基施工期模拟沉降值与
实测值的比较 单位:mm

施工阶段	YJ1 沉降值		YJ3 沉降值	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值
下路堤施工期	44.56	43.83	46.84	45.58
间歇期	46.08	45.40	54.08	53.85
上路堤施工期	46.66	46.65	54.49	55.36
养护期	46.69	47.30	54.85	55.46

3 影响因素分析

设置表 4 所示模拟工况,研究不同镍铁渣-黏土填料、车辆速度与交通荷载对镍铁渣-路基应力与变形的影响。

表 4 模拟工况

工况 编号	镍铁渣-黏土填料	车速/ (km·h ⁻¹)	交通荷 载/kN
1	改良填料 1:黏土 30%+镍铁渣 70%	80	100
	改良填料 2:黏土 35%+镍铁渣 65%	80	100
	改良填料 3:黏土 40%+镍铁渣 60%	80	100
2	改良填料 2:黏土 35%+镍铁渣 65%	60/80/100/120	100
3	改良填料 2:黏土 35%+镍铁渣 65%	80	100/150/180/200

3.1 镍铁渣-黏土填料的影响

采用不同镍铁渣-黏土填料时路基动应力和位移

随路基深度的变化分别见图 3、图 4,镍铁渣-黏土路基顶面位移随距车轮作用点水平距离的变化见图 5。

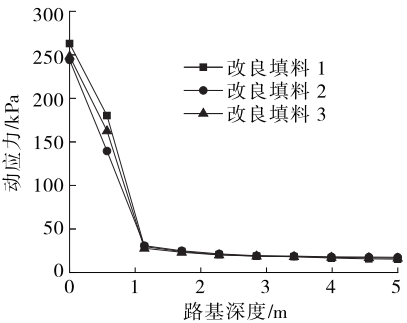


图 3 采用不同镍铁渣-黏土填料时路基动应力与路基深度的关系

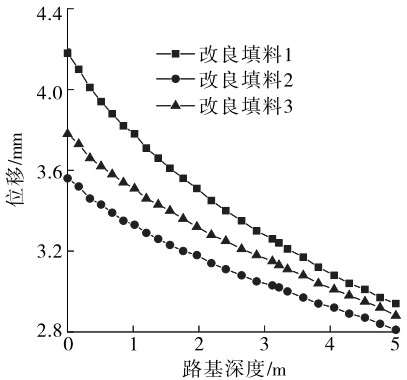


图 4 采用不同镍铁渣-黏土填料时路基位移与路基深度的关系

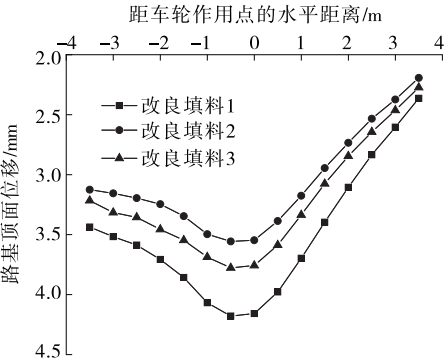


图 5 采用不同镍铁渣-黏土填料时路基顶面位移与距车轮作用点水平距离的关系

由图 3 可知:随着路基深度的增大,路基动应力的变化分为两个阶段,路基深度为 0~1 m 时,路基动应力随路基深度的增大显著降低;路基深度超过 1 m 时,路基动应力随路基深度的增大缓慢降低。采用改良填料 2 时,路基顶面(路基深度为零)的动应力为 244.00 kPa,路基深度 1 m 处的动应力减小到 57.39 kPa,减小 76.48%;路基深度 5 m 处的动应力为 17.44 kPa,仅为路基顶面动应力的 7.15%。

由图 4 可知:镍铁渣-黏土路基位移随路基深度的增大而逐渐减小,大致呈线性变化。在路基同一深度处,改良填料 1 的位移最大,改良填料 2 的位移最小。在镍铁渣-黏土路基顶面,改良填料 1、改良填料 2、改良填料 3 的位移分别为 4.18 mm、3.56 mm、3.78 mm。这是由于在同一路基深度处,3 种改良填料对应的动应力大小为改良填料 1>改良填料 3>改良填料 2,动应力越小,位移越小;3 种改良填料的弹性模量不同,改良填料 1、改良填料 2、改良填料 3 的弹性模量分别为 70 MPa、125 MPa、100 MPa,弹性模量越大,抵抗变形的效果越好,位移减小。

由图 5 可知:交通荷载作用点处镍铁渣-黏土路基顶面的变形最大,随着距车轮作用点水平距离的增加,路基顶面变形逐渐减小。其中作用点右边的位移明显小于左边的位移,改良填料 2 在车轮作用点的位移为 3.55 mm,车轮作用点左边 3 m 处的位移为 3.16 mm,车轮作用点右边 3 m 处的位移为 2.38 mm。这是因为路基右侧设置了土工格栅,表明土工格栅可有效减少路基沉降。

3.2 车辆速度的影响

选取改良填料 2 为路基填料,在交通荷载为 100 kN 的条件下,分析不同车辆速度对镍铁渣-黏土路基动力响应特性的影响。路基不同深度处动应力和位移随车辆速度的变化分别见图 6、图 7。

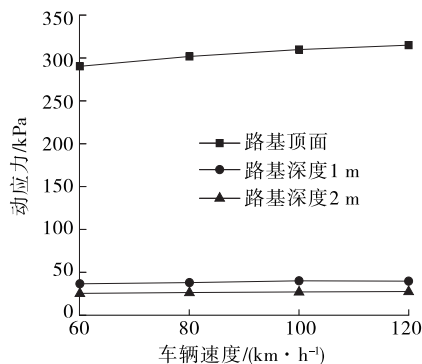


图 6 镍铁渣-黏土路基动应力与车辆速度的关系

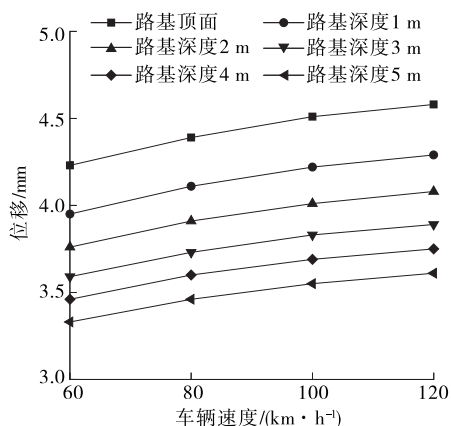


图 7 镍铁渣-黏土路基位移与车辆速度的关系

由图 6 可知:在镍铁渣-黏土路基顶面,动应力随着车速的增大逐渐增加;随路基深度的增加,动应力随车速的增大缓慢增加。车速由 60 km/h 增加至 120 km/h 时,路基顶面动应力增加 24.72 kPa,路基深度为 1 m 处动应力增加 3.11 kPa。在交通荷载作用下,随着车速的提高,路基动应力虽有提高,但增幅不大。

由图 7 可知:随着车速的增加,镍铁渣-黏土路基位移缓慢增加。车速为 60 km/h 时,路基顶面位移为 4.23 mm;车速为 120 km/h 时,路基顶面位移为 4.58 mm,与车速为 60 km/h 时相比,位移增加 0.35 mm。这是因为车辆速度越大,路基的动应力越大,路基变形增大。但总体来说,车辆速度对路基位移的影响不大。

3.3 交通荷载的影响

不同交通荷载作用下镍铁渣-黏土路基的动应力和位移随路基深度的变化分别见图 8、图 9。

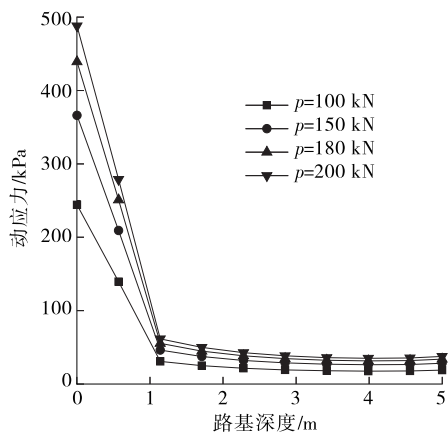


图 8 不同交通荷载 p 下镍铁渣-黏土路基动应力与路基深度的关系

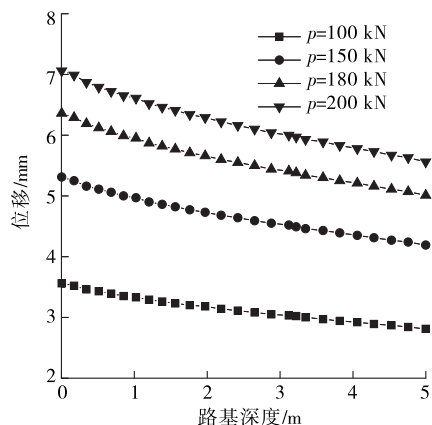


图9 不同交通荷载 p 下镍铁渣-黏土路基位移与路基深度的关系

由图8可知:镍铁渣-黏土路基的动应力随交通荷载的增大而增大。交通荷载为100 kN、200 kN时,路基顶面动应力分别为244 kPa、488 kPa,路基深度1 m处动应力分别为40.71 kPa、72.42 kPa,分别减小203.29 kPa、415.58 kPa。交通荷载越大,对镍铁渣-黏土路基顶面的影响越大。随着镍铁渣-黏土路基深度的增大,交通荷载对路基土体的作用逐渐减弱,距离镍铁渣-黏土路基顶面近的土体承受大部分交通荷载。

由图9可知:随着交通荷载的增大,镍铁渣-黏土路基位移逐渐增大。交通荷载由100 kN增加到200 kN时,路基顶面变形增大2倍,与文献[20]中交通荷载与路基变形近似呈直线关系的结论一致。表明车辆超载是引起路基沉降和产生破坏的一个主要因素。

4 结论

本文采用有限元软件建立镍铁渣-黏土路基模型,分析镍铁渣-黏土填料、车辆速度和交通荷载对镍铁渣-黏土路基动应力与变形的影响。主要结论如下:

(1) 在镍铁渣-黏土路基同一深度处,交通荷载对车轮作用点的影响最大。车轮作用点处变形最大,随着距离车轮作用点越来越远,变形逐渐减小。

(2) 在镍铁渣-黏土路基不同深度处,路基产生的动应力随路基深度的增大先显著下降后缓慢降低。路基变形随路基深度的增大逐渐减小,大致呈线性变化。

(3) 路基的动应力和变形随车辆速度和交通荷载的增大而增大,交通荷载对路基动应力与变形的

影响显著高于车辆速度的影响。

参考文献:

- [1] 何忠明,邱俊筠,柯唯,等.交通荷载作用下粗粒土高路堤动力特性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(9):2571-2579.
- [2] 张幸幸,张建民,温彦锋.长期交通荷载作用下路基沉降的实用计算方法[J].岩土工程学报,2015,37(11):2067-2072.
- [3] 刘维正,石志国,章定文,等.交通荷载作用下结构性软土地基长期沉降计算[J].东南大学学报(自然科学版),2018,48(4):726-735.
- [4] 耿大新,杨泽晨,王宁,等.交通动荷载引起的公路路基应力响应试验研究[J].公路,2021,66(12):1-7.
- [5] 石熊.高速铁路路基动力累积变形模型试验研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(6):1346-1355.
- [6] FENG S, LEI H. A settlement prediction model considering tidal loading and traffic loading of soft soil subgrade[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 144: 104639.1-104639.14.
- [7] XU F, YANG Q, LIU W, et al. Dynamic stress of subgrade bed layers subjected to train vehicles with large axle loads [J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 2916096.1-2916096.12.
- [8] 罗烈日,郑俊杰.交通荷载下斜坡加筋路堤动力特性研究[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(4):72-76.
- [9] 刘飞禹,张乐,余伟,等.交通荷载作用下桩承式加筋路堤性能分析[J].土木工程学报,2011,44(增刊2):50-54.
- [10] GAO X H, TIAN W P, LI J C, et al. Analysis of deformation characteristics of filled subgrade treated by micro-pile[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 5755796.1-5755796.8.
- [11] 余云燕,刘武通,付艳艳,等.交通荷载作用红层填料道路沉降细观模拟[J].地震工程学报,2023,45(1):1-11.
- [12] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [13] 陈剑,苏跃宏.交通荷载作用下公路路基动力特性的数值模拟研究[J].公路交通科技,2011,28(5):44-48.
- [14] 杨明,郑博.车辆荷载作用下路堤边坡动力特性分析[J].吉林水利,2021(5):32-36+40.
- [15] 李埃军,段康进,张新元,等.交通荷载作用下风积沙低路基动力响应分析[J].路基工程,2018(3):26-30+45.

(下转第80页)

断面,每个监测横断面上监测点不少于 7 个。其中沉降监测点 3 个,位于路中线、两侧路肩;水平位移监测点 4 个,分别设置在两侧边沟外缘及边沟外距离边沟 10 m 处^[5]。施工期间位移每 3 d 监测一次,遇强降雨及突发性暴雨时增加 1 次;施工结束后至道路通车前,15 d 监测一次;道路通车 1 年半时间内 1 个月监测 1 次^[5]。记录沉降、位移变化,绘制时间-沉降(位移)变化曲线。2) 地下水监测。地下水采用水位自动记录仪进行监测,滑坡段至少设置 3 处地下水监测断面,每个监测断面设置 2 个监测点。监测点应尽可能靠近公路路基,确保监测数据的准确性^[6]。监测频率与位移监测一致。记录地下水位变化与降雨的关系,绘制时间-水位、水位-降雨变化曲线。

根据该滑坡处治后两个雨季的监测结果,滑坡治理后道路位移量和沉降量均较小,雨季地下水位较低,滑坡体基本处于稳定状态,支撑渗沟处治滑坡的效果良好。

4 支撑渗沟应用优点

(1) 治水是治理滑坡灾害的关键,支撑渗沟兼具排水和支撑作用,能有效疏排地下水,破坏潜在滑动面,提高滑坡体的自身稳定性,同时对滑坡体有一定支撑作用,可从病害机理上解决问题。

(2) 支撑渗沟内部填充材料来源广,片石、块石、碎石、卵石等透水性材料均可。山区公路一般是挖方大于填方,会产生大量弃石方,支撑渗沟内部填充材料可直接利用弃石方,取材方便。

(3) 支撑渗沟的施工期比抗滑桩短,对于工期紧的项目是一大优点。抗滑桩需跳桩施工、进行混凝土养护,施工持续时间长,不利于工期紧的项目抢抓工期^[7]。支撑渗沟施工简单,施工快。

(4) 应用案例支撑渗沟治理方案的建安费为 487 万元,抗滑桩治理方案的建安费为 658 万元,支

撑渗沟的建安费比抗滑桩节约 171 万元,节约投资 26%,支撑渗沟的经济优势较明显。

(5) 支撑渗沟治理滑坡比支挡工程更符合环保、美观的需求。建筑工程是一种对大自然的特殊改造,应尽量做到工程与自然和谐共处。支撑渗沟治理滑坡顺应自然,施工完成后表面看不出工程痕迹,环保、美观。

5 结语

滑坡灾害治理需根据滑坡类型、滑坡规模、水文地质条件、施工条件、工期条件、经济条件等,通过方案比选确定技术可行、经济合理、快速、环保的处治方案。在地质构造复杂、土质不均匀、雨水较多的山区,浅层公路滑坡灾害采用支撑渗沟治理技术可行、经济、环保、施工难度小、施工速度快,且处治效果较好,可有效减少支挡工程的应用规模。采用支撑渗沟治理滑坡可有效提高治理效果并降低治理成本。

参考文献:

- [1] 罗文君,罗家国,罗光.支撑渗沟在膨胀土路堑边坡处治中的应用[J].公路与汽运,2005(2):63-65.
- [2] 李晟,刘浪.支撑渗沟在膨胀土浅层路堑边坡处治中的应用[J].科技资讯,2024,22(5):122-124.
- [3] 陈占红.铁路路基支撑渗沟工程施工技术探讨[J].建筑·建材·装饰,2019(8):86-87.
- [4] 黄宁.浅谈支撑渗沟在滑坡治理中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2016,6(8):2176.
- [5] 中交第一公路勘察设计院有限公司.公路软土地基路堤设计与施工技术细则:JTG/T D31-02—2013[S].北京:人民交通出版社,2013.
- [6] 李金标,黄厚昱.西南复杂山区国省干线公路养护地质灾害特征及处治原则[J].公路与汽运,2021(2):82-86.
- [7] 王杜,王朦,李者,等.含软弱夹层路堑边坡开挖变形及稳定性分析[J].交通科学与工程,2022,38(3):26-32.

收稿日期:2023-12-11

(上接第 75 页)

- [16] 贺炜,刘剑锋,尹平保,等.工业镍铁渣的路用特性及原位试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(10):1809-1816.
- [17] 尹平保,杨文斌,贺炜,等.镍铁渣加筋路堤填筑方法及足尺试验[J].中国公路学报,2020,33(5):55-65.
- [18] 尹平保,王书勤,贺炜,等.镍铁渣-黏土-水泥改性土力学特性试验及修正的邓肯-张模型[J].工程科学与技

术,2022,54(5):93-102.

- [19] 王书勤,尹平保,贺炜,等.镍铁渣-黏土改性土承载特性试验研究[J].公路与汽运,2022(4):63-67.
- [20] 李又云,张玉伟,李恒,等.车辆荷载下黄土参数对路堤沉降变形的影响[J].铁道科学与工程学报,2018,15(2):361-368.

收稿日期:2023-05-22