

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.005

岩溶区桩体单侧堆载效应数值模拟分析

闵建刚¹, 顾红林², 杜鹏^{3*}, 徐磊², 吴顺远², 宁月湖²

(1. 云南省曲靖市交通工程质量安全监督站, 云南 曲靖 655000; 2. 云南省曲靖市交通建设投资集团有限公司, 云南 曲靖 655000; 3. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:岩溶区桩基础单侧堆载可能引起地面下沉、桩身侧移,甚至引起工程事故,揭示该堆载效应有利于维护桩身安全,指导工程决策。该文采用Abaqus建立岩溶区桩土相互作用模型,揭示岩溶区桩基单侧堆载效应,为岩溶区桩基设计和单侧堆载决策提供依据。结果表明:①单侧堆载作用下,桩顶沉降、桩顶侧移随单侧堆载量增大而增大;②单侧堆载量相同时,桩顶沉降、侧移峰值、土层桩身弯矩峰值随堆载距离的增大而减小,桩顶侧移、桩前后土压力峰值、桩身轴力峰值随堆载距离增加呈指数函数规律减小。随着堆载距离的增加, p - y 曲线更容易收敛。堆载距离小于4 m,最危险截面在土层深度的1/4、1/2处;堆载距离超过4 m,最危险截面在土岩结合面;③桩身溶洞对嵌岩桩的桩顶沉降、桩身侧移、桩身内力、桩身前后土压力及 p - y 曲线影响不明显。

关键词:岩溶;桩基础;单侧堆载;数值模拟

中图分类号:U443.15

文献标志码:A

0 引言

岩溶又称为喀斯特(Karst),在中国具有十分广泛的分布,涵盖了贵州、广西、云南和湖南等地,超过了中国国土面积的1/3^[1]。桩基础因承载力高、适应性强、稳定性好,在建筑、桥梁和海洋工程领域得到了广泛的应用。桩侧大面积堆载可能引起地面下沉、桩身侧移,甚至引起工程事故^[2-4]。桩基础施工期和竣工后可能需要在堆载,堆载位置常常困扰工程决策,引起学术界和工程界的关注^[5-6]。邵军义等^[7]采用“拟合曲线法”推导出了堆载和轴力作用下桩身侧移和内力的计算公式;以杭甬高铁某特大桥桥墩为例,聂如松等^[8]为探究堆载对桥墩内力和变位的影响,开展了3D有限元模型的数值分析,认为堆载距离 d 小于4倍软土层厚度 h 时,桥墩水平变位随堆载距离增加而迅速下降;堆载距离大于4倍软土层厚度时,桥墩水平变位随着 d/h 比值的增大而下降缓慢,桥墩堆载距离受软土厚度、堆载规模和上部结构等多种因素的影响;

贺坤龙等^[9]采用Midas GTS三维实体软件模拟施工便道及填土堆载对软土地基上高铁桥墩、桩基础安全稳定性的影响,认为高铁桥梁施工便道设置于承台边缘10 m以外,当填土堆载厚度为3 m时,堆载边缘应远离承台边缘30 m以上,当填土堆载厚度为5 m时,堆载边缘应远离承台边缘70 m以上,才能满足桥墩墩顶位移限值要求;王军等^[10]以郑徐高铁某特大桥为研究对象,构建了桩侧堆载的三维有限元模型,开展了黄淮河冲积平原区砂性土上堆载对桥墩的影响的研究,发现桩侧的负摩阻力主要分布在 $0.57L$ (L 为桩长)区域,距桩顶 $0.29L$ 附近出现了负摩阻力峰值,且距桩顶 $0.52L$ 附近出现了轴力峰值。随着堆载距离的增加,桩侧的摩阻力和桩身的轴力均逐渐减小,且该减小幅度在堆载距离超过桩径的5倍时变得更为显著;马学宁等^[11]对黄土中 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 群桩基础在单侧边载作用下各桩承载力学特性和安全稳定性开展了模型试验,发现边载对邻近排桩的侧摩阻力、轴力和中性点位置影响最显著,中间排桩影响次之,而远离边载侧的排桩影响最小,无负摩阻力;各桩基承载力安全

收稿日期:2023-04-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278329);湖南省交通运输厅科技项目(编号:202019,202247);湖南省研究生科研创新项目(编号:CX20210765,CX20210774);海南省自然科学基金青年基金资助项目(编号:520QN283,521QN266)

作者简介:闵建刚,男,高级工程师.E-mail:859173439@qq.com

*通信作者:杜鹏,男,博士研究生,副教授.E-mail:pengdu_ctgu@163.com

系数随着边载的增加而减小,同时会随边载距离的增加而增大;杨敏等^[12]利用有限元法分别对无桩自由场和桩土复合场侧向位移进行了数值分析,探究土体弹性模量和泊松比分别对桩、土侧向位移的影响,分析认为:无桩自由场土体侧向位移分布表现为上部软土抛物线形和下部硬土倒三角形,而设置桩基后,单桩侧向变形模式因土体本构模型、弹性模量和泊松比的变化而不同;刘小林^[13]基于Midas GTS NX软件建立多层土体地基上不同堆载工况下桩基的地基计算模型,分析了堆载宽度、高度和位置对桩基水平和竖向变形、轴力、剪力和弯矩分布的影响,认为桩基水平位移随深度增加先增大后降低,最大剪力随桩基埋深和堆载宽度的增加而增大,最大水平位移和弯矩均随堆载宽度呈指数形增长,且出现位置向深部转移。桩基最大水平位移和最大弯矩随堆载高度增加分别呈现指数型和线性增长,随堆载距离增加分别呈线性和指数型降低;尹骥^[14]通过上海青浦区现场1:1足尺试验,研究PHC-500-AB-125型管桩在侧边堆载作用下的侧向变形模式和桩顶侧向刚度对管桩变形的影响,认为在堆载作用下土体侧向变形模式表现为“抛物线形”或“倒三角形”分布,侧向变形主要集中于浅层软弱土层,且距桩顶4~5 m深度快速向下衰减。邻近堆载作用下,桩顶自由的桩身侧向变形主要为“倒三角形”分布模式,桩顶受到水平约束时的桩身浅层侧向变形主要表现为“顶部小、中部大”的“梯形”分布模式;文献[7-14]表明:侧向堆载作用下桩的承载性能研究主要集中于软土地基^[7-9]、砂性土地基^[10]、黄土地基^[11]、多层土地基^[12-14]等非岩溶区地质条件,并取得了一些进展,但是,侧向堆载对岩溶区穿洞桩的传力机制和承载性能尚不清楚,现行规范也未能对此提供有效的设计方法。本文利用Abaqus软件在文献[15]的基础上对侧向堆载作用下岩溶桩基的力学特性进行深入分析,探究堆载距离和堆载量对桩身内力、桩身侧移和桩土压力等的影响规律,并分析岩溶桩基的整体稳定性,为岩溶区科学决策地面堆载的可行性及安全位置设计提供依据。

1 数值模拟

1.1 数值模型

为了最大限度地揭示侧向堆载对穿洞桩基承载

特性的影响规律,同时考虑边界效应和计算消耗,拟定计算模型的地层为50 m×20 m×50 m(长×宽×高)的区域,其中土层厚度为20 m;模型桩的桩径 D 为1 m,桩长 L 为30 m,溶洞尺寸设为8 m×4 m×3 m,基桩下穿溶洞嵌岩5 D ,堆载面积4 m×4 m。计算模型示意图见图1。

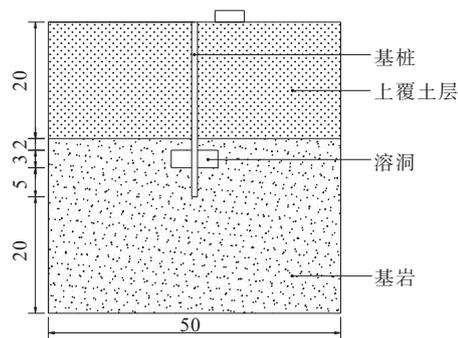


图1 计算模型示意图(单位:m)

为加快计算速度,该计算模型取半;为保证计算精度,在控制整体网格密度的基础上,对基桩和溶洞区域进行局部加密。土体和基桩均选用C3D8R实体单元,土体单元网格数12 112个,基桩单元网格数120个,其3D模型网格图如图2所示。为了满足模型的边界条件,在模型底部施加3个方向的位移约束,并对模型的侧面施加水平位移约束;为模拟真实情况,将地表设为一个自由面。

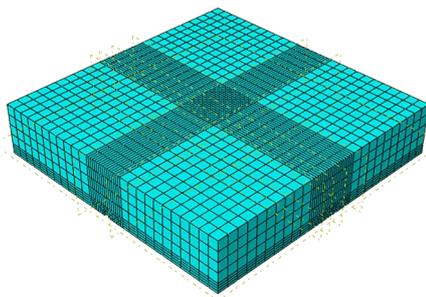


图2 3D模型网格图

1.2 材料力学参数

为探究穿越溶洞对基桩承载特性的影响,设定堆载距离为1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m,最大堆载量为3 000 kN。假定桩基为线弹性材料,粉质黏土和石灰岩为弹塑性材料,采用摩尔库仑屈服准则描述材料的塑性行为。桩-土-岩的材料力学参数根据实际工程的地质条件拟定,如表1所示。

表1 材料力学参数

材料类型	弹性模量/kPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)
基桩	3.00E+07	0.20	2.50	—	—	—
粉质黏土	1.20E+04	0.30	1.85	39	14	0.5
石灰岩	1.40E+07	0.25	2.60	3 000	35	12

利用 Abaqus 软件中的主-从接触算法建立桩-土-岩之间的接触关系,基桩设为主控面,土岩设为从属面。为了较为准确地描述界面的摩擦行为,界面的相互作用关系被定义为库仑摩擦模型,并设置摩擦系数 $\mu=0.2$ 。

1.3 初始地应力平衡

为了更真实地模拟地层的原始地应力状态,首先不考虑桩基的影响,仅对完整的地层施加重力以实现初始地应力平衡;然后引入桩基模型并施加重力,同时通过定义接触对的参数以实现桩-土-岩的界面相互作用,确保桩基与地层模型的正确连接。图3显示了初始地应力平衡的状态,地应力平衡后 U_3 达到了 10^{-6} 量级,且模拟地应力 S_{33} 与理论计算基本相符。因此,初始地应力平衡效果较好,确保了后续计算分析的可靠性和准确性。

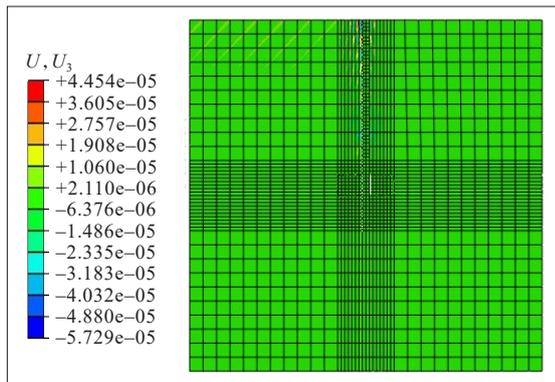
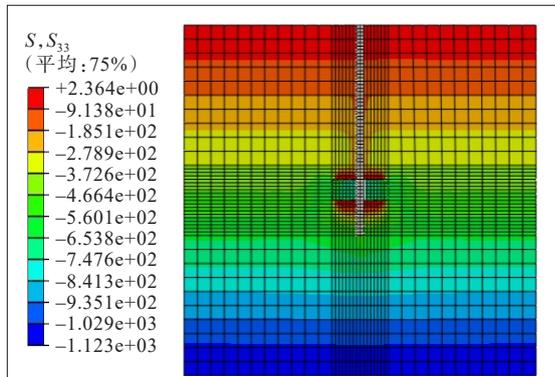
(a) U_3 位移云图(单位:m)(b) S_{33} 应力云图(单位:MPa)

图3 初始地应力平衡状态下位移和应力云图

2 模拟结果分析

2.1 桩顶沉降随单侧堆载位置和大小变化规律

图4为桩顶沉降 s 随单侧堆载 P 变化曲线,其中 d 代表堆载距离,下标0和1分别表示无溶洞地层和下穿溶洞地层。

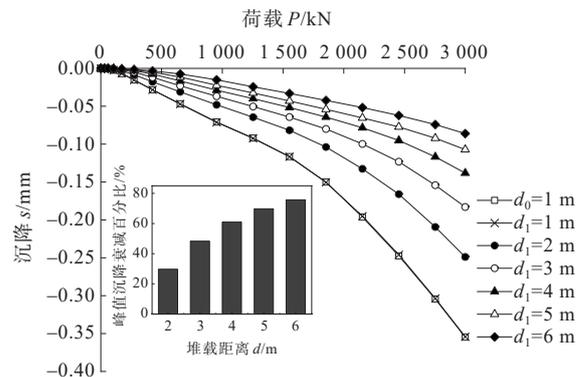


图4 堆载-桩顶沉降曲线

由图4可知:单侧堆载 P 与桩顶沉降 s 呈缓变形变化,并具有明显的规律性。分析发现:①固定位置的单侧堆载作用下,随着单侧堆载量的增加,桩顶沉降逐步增大;②单侧堆载量一定时,随着堆载距离的增大,堆载对桩顶沉降的影响逐渐减小。例如,堆载 $P=3\ 000\ \text{kN}$ 时,堆载距离 $5D$,则峰值沉降衰减百分比(某堆载距离时的桩顶沉降量与堆载距离 $1D$ 时的桩顶沉降量之比)为69.7%;若按照 $4D$ 堆载距离计算,峰值沉降衰减百分比为61.0%;③无论嵌岩桩是否穿越溶洞,单侧堆载对桩顶沉降的影响并不显著。

2.2 桩身侧移随单侧堆载位置和大小变化规律

图5为侧向堆载 $P=3\ 000\ \text{kN}$ 时桩身侧移随堆载位置的变化曲线,图6为桩顶侧移随堆载位置和大小变化曲线。

由图5、6可知:

(1) 嵌岩桩桩身侧移受桩身溶洞影响不明显。

(2) 一定的堆载作用下,桩身侧移的分布形态随堆载距离的不同而变化,且侧移峰值位置随堆载距

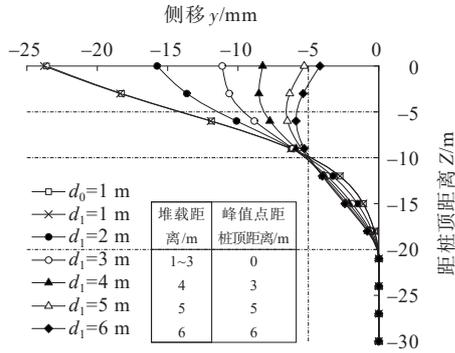


图5 桩身侧移随堆载位置的变化曲线

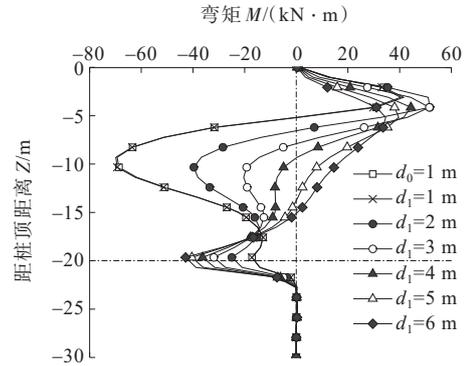


图7 不同堆载距离对桩身弯矩影响规律

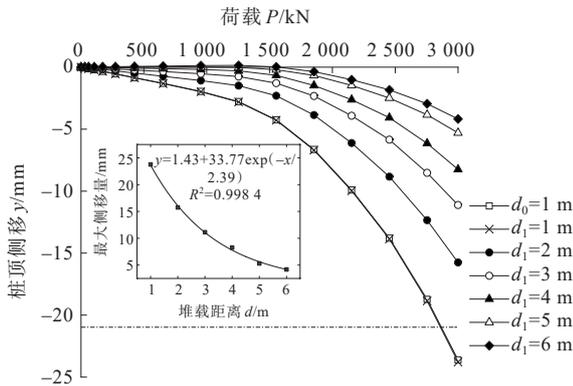


图6 桩顶侧移随堆载位置和大小变化曲线

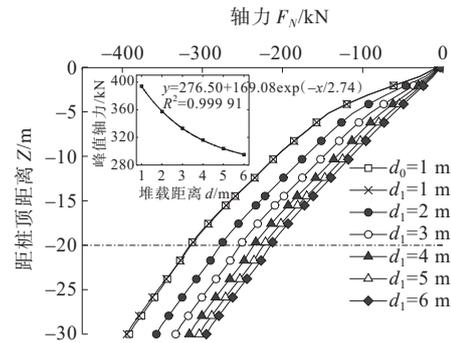


图8 不同堆载距离对桩身轴力影响规律

离的增加沿桩身下移,但1/3桩长处侧移不随堆载距离变化而变化。随着堆载距离的增加,桩身侧移峰值逐步减小。

(3) 桩顶的侧向位移随着单侧堆载的增加而逐渐增大;当堆载 P=3 000 kN 时,桩顶侧移随堆载距离增加,按指数函数规律衰减。

2.3 单侧堆载位置对穿洞桩桩身内力影响规律

图7、8分别为侧向堆载 P=3 000 kN 时,不同堆载距离对桩身弯矩和轴力的影响规律。

由图7、8可知:

(1) 对于嵌岩桩,桩身溶洞的存在并没有明显改变桩身的内力。

(2) 桩身弯矩沿深度呈“S”形分布,在土层深度的1/4、1/2和土岩结合面处有峰值。

在土层内,随着堆载距离的增加,桩身弯矩峰值呈递减趋势,而土岩结合面处桩身弯矩峰值则呈递增趋势。堆载距离小于4 m,最危险截面在土层深度的1/4、1/2处;堆载距离超过4 m,最危险截面在土岩结合面。

(3) 桩身轴力随深度增加而增加,峰值随堆载距离增加呈指数衰减,且土岩分界处未出现突变。

2.4 单侧堆载位置对桩身前后土压力的影响规律

图9、10分别为侧向堆载 P=3 000 kN 时,不同堆

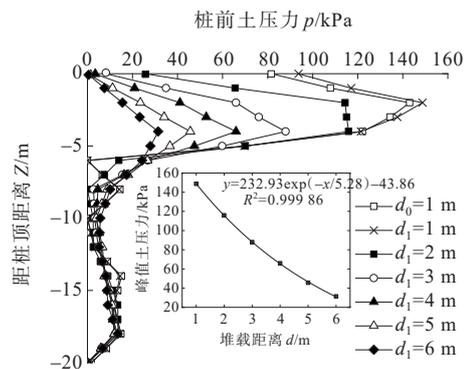


图9 不同堆载距离对桩前土压力影响规律

载距离对桩前、桩后土压力的影响规律。

由图9、10发现:

(1) 桩身溶洞基本不影响嵌岩桩桩身前后土压力的分布。

(2) 桩前土压力沿深度先增大后减小,有1个峰值,峰值土压力位置离桩顶距离约为土层段桩长的1/5,且随堆载距离增加呈现指数衰减。

(3) 随着堆载距离的增加,桩后土压力(弹性抗力)随深度减小;桩后土压力峰值在桩顶处,且随着堆载距离增加呈现指数衰减。

2.5 单侧堆载作用下 p-y 曲线特征

p-y 曲线是用于描述单桩在水平荷载作用下,桩侧

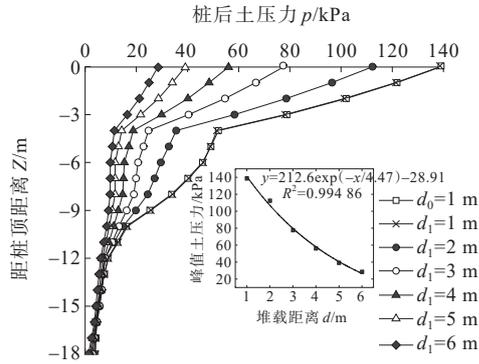


图10 不同堆载距离对桩后土压力影响规律

土抗力与桩身水平位移之间的关系曲线。其形状和特征受桩身的刚度、土体力学性能、施加在桩顶的荷载以及桩端的约束条件等多种因素影响,目前已有多种拟合曲线方程,本文参考杨明辉等^[16] p - y 曲线方程,考虑桩基单侧堆载作用,提出本文的拟合曲线方程如下:

$$p/p_u = \alpha (y/y_{50})^\beta \quad (1)$$

式中: p_u 为桩周土极限的土抗力; y_{50} 为极限土抗力 $0.5p_u$ 时对应的桩侧水平变形。

根据 Duncan-Chang 双曲线模型^[17]求得不同深度的极限土抗力 p_u 和 y_{50} ,然后通过式(1)拟合得到参数 α 和 β 。限于篇幅,只给出不同堆载距离时桩深 $z=2D$ 和 $d_1=1\text{ m}$ 工况下的 p - y 曲线,如图11、12所示。

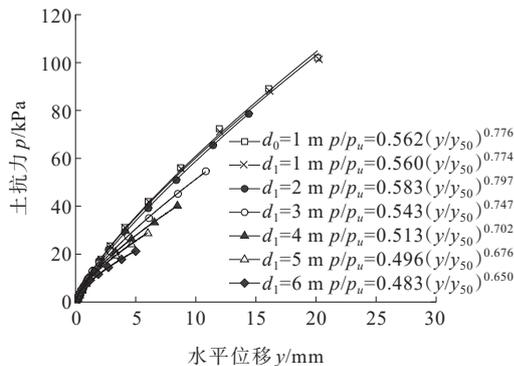


图11 $z=2D$ 时不同堆载距离的 p - y 曲线

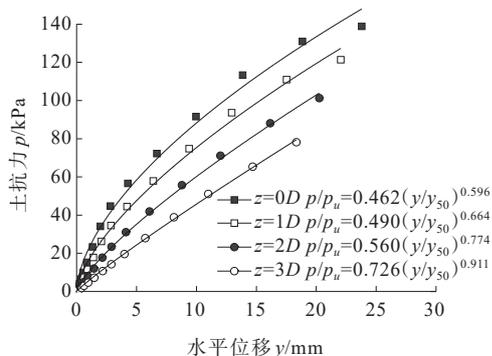


图12 $d_1=1\text{ m}$ 时不同位置的 p - y 曲线

由图11、12可知:

- (1) 采用式(1)拟合单侧堆载下穿越溶洞桩基的 p - y 曲线,效果良好。
- (2) 单侧堆载条件下嵌岩桩的 p - y 曲线受溶洞的影响较小;随着堆载距离的增加, p - y 曲线更容易收敛。
- (3) 随深度增加, p - y 曲线逐渐呈现直线形。

3 结论

单侧堆载作用下,岩溶区基桩将产生侧向位移和弯矩等,分析并认识其变化规律,有利于维护桩身安全。

- (1) 固定位置的单侧堆载作用下,桩顶沉降、桩顶侧移随单侧堆载增大而增大。
- (2) 单侧堆载大小相同时,桩顶沉降、侧移峰值、土层弯矩峰值随堆载距离的增大而减小,桩顶侧移、桩前后土压力峰值、桩身轴力峰值随堆载距离增加呈指数函数规律减小。随着堆载距离的增加, p - y 曲线更容易收敛。堆载距离小于4 m,最危险截面在土层深度的1/4、1/2处;堆载距离超过4 m,最危险截面在土岩结合面。
- (3) 桩身溶洞对嵌岩桩的桩顶沉降、桩身侧移、桩身内力、桩身前后土压力及 p - y 曲线影响不明显。

参考文献:

- [1] 康厚荣,罗强,梅世龙,等.岩溶地区公路修筑技术研究[J].公路交通科技,2009,26(11):36-43.
- [2] 杨敏,朱碧堂,陈福全.堆载引起某厂房坍塌事故的初步分析[J].岩土工程学报,2002,24(4):446-450.
- [3] 冯忠居,张永清,李晋.堆载引起桥梁墩台与基础的偏移及防治技术研究[J].中国公路学报,2004,17(3):77-80.
- [4] 张浩,石名磊,胡伍生,等.互通区跨线桥邻近路基墩柱偏移事故分析[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(3):617-623.
- [5] 贺志勇,张浩然,杨程,等.某高速公路匝道桥非对称堆载下的安全性分析研究[J].中外公路,2021,41(6):107-113.
- [6] 周德泉,颜超,邓超.堆载作用下桩体工程特性研究[J].中外公路,2015,35(1):5-9.
- [7] 邵军义,朱珊.堆载下软粘土地基及桩的侧向位移[J].金属矿山,1994,29(7):30-33.
- [8] 聂如松,冷伍明,魏丽敏,等.堆载对既有桥墩桩基础影响距离分析[J].水文地质工程地质,2017,44(1):64-70.

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.006

新型排水管在渗沟结构中的排水性能试验研究

王刚,邹静蓉,李嘉慧,孙毅凯

(中南林业科技大学 土木工程学院,湖南长沙 410000)

摘要:目前土工布包裹带孔PVC排水管,中间填充碎石(砾石)是大多数高速公路路基工程中最常用的渗沟结构,这种结构在使用前期排水效果不错,但是一旦包裹的土工布破坏,容易造成排水管淤堵甚至整个渗沟失效。为提高渗沟的排水寿命,在室内开展历时半年的新型渗沟结构试验研究,对比塑料盲沟、硬式透水管、带孔PVC管3种排水管在不同渗沟填充结构下的排水性能,系统地研究不同管材在不同反滤层、不同水压力条件下,渗沟排水性能的变化规律。结果表明:①当反滤层为中粗砂时,几种排水管的排水效率比碎石作反滤层有一定的上升;②3种排水管中,塑料盲沟在两种渗沟结构中排水效果最优,其排水效率为带孔PVC管的2倍多;③塑料盲沟填充中粗砂作为反滤层的渗沟结构,能够显著提高渗沟的排水效率。

关键词:渗沟;新型排水结构;塑料盲沟;排水效率;反滤层

中图分类号:U417.3

文献标志码:A

0 引言

公路设置渗沟是为降低地下水位或拦截地下水,使路基工作区保持干燥或中湿状态,保证路基处于稳定状态。渗沟主要有填石渗沟、管式渗沟、洞式渗沟等形式,管式渗沟是公路路界地下排水中最有效的方法之一,尤其适用于地下水流量较大,或排水距离较长的路段^[1]。管式渗沟的排水管可选用各类

带孔的塑料管、软式透水管、水泥混凝土管等材料^[2]。大多数公路的渗沟采用打孔的PVC管,管外填充最小粒径为15 mm的碎石或砾石,再用土工布将碎石包裹,此类渗沟使用初期排水效果较好,但因为碎石是松散集合体,且本身带有棱角,自重大,在碎石和外部土体的共同作用下,土工布容易被刺破,导致渗沟被泥土堵塞失效^[3-4]。为提升高速公路渗沟的排水效果和使用寿命,降低公路养护管理成本,需要进一步针对渗沟设计进行新材料和新结构探索。

- [9] 贺坤龙,李聪林,许伟,等.深厚软土地段施工便道及堆载对高铁桥墩桩基安全性影响分析[J].中外公路,2021,41(3):236-240.
- [10] 王军,马学宁.堆载作用下桩基受力特性分析[J].铁道建筑,2018,58(9):72-75.
- [11] 马学宁,付江,王军,等.不同堆载形式对群桩负摩阻力的影响[J].岩土力学,2018,39(10):3531-3538.
- [12] 杨敏,朱碧堂.堆载下土体侧移及对邻桩作用的有限元分析[J].同济大学学报(自然科学版),2003,48(7):772-777.
- [13] 刘小林.复杂土层条件下堆载对邻近桥梁桩基受力变形的影响及控制研究[J].五邑大学学报(自然科学版),

- 2023,37(1):71-78.
- [14] 尹骥.侧边堆载对管桩桩身侧向变形影响试验研究[J].地基处理,2022,4(S1):99-104.
- [15] 周德泉,张杨龙,曹勇,等.溶洞高度影响嵌岩桩轴力传递及桩侧超载响应试验[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(7):83-93.
- [16] 杨明辉,朱刘山,罗宏,等.坡地条件下水平受荷单桩 $p-y$ 曲线法试验与数值模拟[J].公路交通科技,2017,34(8):83-90.
- [17] 曹卫平,夏冰,葛欣.水平受荷斜桩双曲线型 $p-y$ 曲线的构建及其应用[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(10):1946-1954.

收稿日期:2023-07-20(修改稿)

基金项目:湖南省交通科技项目(编号:201911)

作者简介:王刚,男,硕士研究生.E-mail:2412457120@qq.com