

多雨山区路基渗流特性现场试验研究

范东, 王东明

(广州市高速公路有限公司, 广东 广州 510315)

摘要: 为研究多雨山区路基渗流特性, 在广州某山区高速公路的一般挖方路基、隧道口挖方路基及填方路基不同深度处理设 TDR 水分传感器, 监测降雨条件变化对路基含水率的影响。结果表明, 降雨量带来路基湿度的显著变化, 强降雨季节增湿明显; 不同断面形式路基的含水率受降雨影响的程度由大到小依次为隧道口较远处、挖方路基碎落台、挖方路基硬路肩、隧道口较远处、填方路基硬路肩; 良好的路面结构能有效阻隔雨水入侵路基内部。

关键词: 公路; 路基; 渗流特性; 现场监测; 多雨山区

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)05-0077-05

近年来, 全球极端性天气频繁发生, 多雨山区公路受到较大侵扰, 常引发道路水毁事故。路基土体为典型多孔介质材料, 随着水、温度势能的反复作用, 土体内部水气运移活跃。控制路基湿度的水分主要来源于地表水及地下水, 入渗的雨水除增大路基湿度外还产生一定渗流力, 影响路基的稳定性。不少学者主要依靠室内试验或数值分析开展路基渗流特性研究, 缺乏系统的实测数据来论证, 得出的结论难免与工程实际有较大偏差; 即便采取现场试验方法, 研究对象大多为填方路基, 较少针对路堑特别是特殊路段(深路堑、隧道口附近路基)开展研究, 研究成果的全面性不足; 部分研究受条件所限, 投入设备规模不足、监测时长较短, 影响结论的准确性。该文以广州某山区高速公路为研究对象, 选取水文地质条件相似的一般挖方路段、隧道口挖方路段及填方路段进行现场试验, 通过监测路基土体含水率, 结合实际降雨状况, 对路基渗流特性进行分析, 为路基设计参数取值优化和防排水设计提供参考。

1 现场试验方案

1.1 试验设备

含水率现场监测一般采用取样测定和原位测定法。鉴于试验路段已通车运营, 大范围取样土体难度大, 采用原位测定法。TDR 水分传感器为目前使用较广、高效的含水率监测设备, 其通过测量土壤介电常数获得土壤含水率, 具有测量速度快、操作简便、精度高等特点。TDR-3 型土壤水分传感器通过晶体振荡器发射高频信号, 信号流通至平行的金属探针上, 反馈的信号与出发信号叠加, 以测量信号

的振幅表征土壤含水量。其工作流程见图 1。

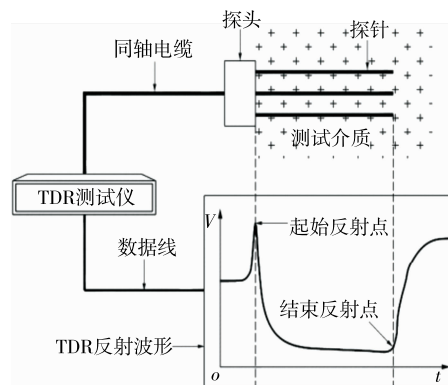


图1 TDR监测系统的工作流程

1.2 试验设备布设

试验路段日车流量巨大, 为保证其正常运营, 且不影响试验结果的准确性, 选择在硬路肩中心或碎落台中心位置埋设传感器。在一般挖方路段(截面 A-A)的硬路肩中心及坡脚碎落台中心钻孔 1[#]、2[#], 在距离路表 110、170、230 cm 处埋设水分传感器并编号。填方路段(截面 D-D)及隧道洞口路段(截面 B-B、截面 C-C)的布设方案类似(见图 2)。

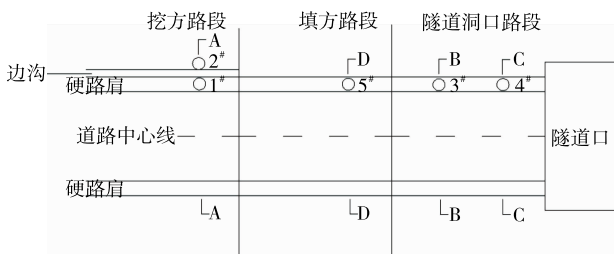


图2 水分传感器平面布设方案

试验仪器在埋置后能否顺利发挥其功能, 很大

程度上依赖于施工工艺的好坏。钻孔后需把水分传感器准确定位在预先留置的深度,且水分传感器的金属探头需充分接触周围土体,回填土应妥善保留,避免潮湿影响监测结果,土料回填后需充分压实。传感器布设施工完毕后进行试验观测及数据收集,常规阶段每周进行2次数据收集,雨季来临或强降雨发生期收集频率加密,雨季结束后降低收集频率但不少于每两周1次。

2 路基渗流特性试验结果及分析

为全面研究多雨山区路基渗流规律,结合试验期间降雨量特点进行分析,监测周期包括雨季及旱季。在收集监测数据的同时查看降雨量资料(见图3)。由3可知:5—8月为主要雨季,1—3月及11—12月为少雨季节,其中5月为强降雨月份,降雨量接近800 mm。

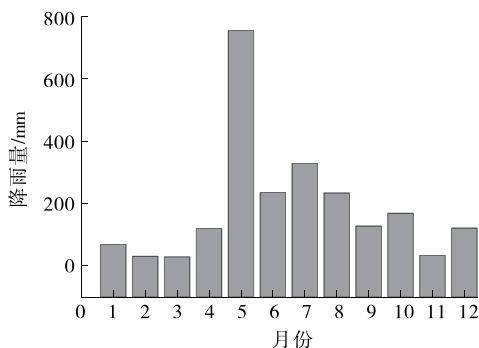


图3 降雨量统计

2.1 一般挖方断面路基渗流特性

2.1.1 硬路肩中心位置

在硬路肩中心位置距路表110、170、230 cm处埋设水分传感器,依次编号1[#]-3、1[#]-2、1[#]-1。为消除水分传感器个体差异造成的误差,并更直观地反映含水率变化趋势,根据监测数据绘制体积含水率相对变化量与时间的关系曲线(见图4)。

由图4可知:1) 1[#]-2、1[#]-1监测期内其整体含水率均比初期值大,而1[#]-3在雨季来临时其含水率仍比初期值小。主要原因是受施工因素影响,回填土体不可避免地接触到大气水分,回填土体含水率升高;随后压实土体,积聚水分往路基上部迁移,致使1[#]-3初期含水率相对较大。2) 不同深度处含水率相对变化量均随雨量的增减呈先升后降的趋势。1[#]-3自4月底含水率逐渐上升,到6月含水率变化稳定,8月过后含水率下降;1[#]-2自5月

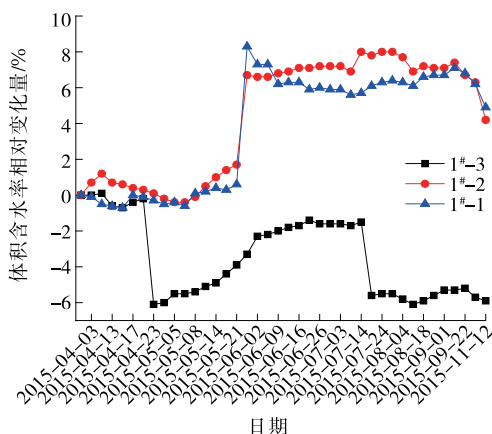


图4 一般挖方路基体积含水率相对变化量与时间的关系 (硬路肩中心位置)

初含水率逐渐上升,6—9月含水率变化稳定,9月过后含水率下降;1[#]-1自5月底含水率上升较快,之后短时间内有所下降,随后变化趋势与1[#]-2相似。降雨作用下路基渗流在一定深度范围内存在时序性,距离路表较近的1[#]-3含水率最先变化,随后依次是1[#]-2、1[#]-1,水分呈由上往下迁移的规律。主要是由于雨季期1[#]-3含水率升幅较平缓,5—8月含水率变化量在3%左右;而同期1[#]-2、1[#]-1含水率出现较大波动,在强降雨月份,1[#]-2、1[#]-1含水率升幅分别达6.5%和8.4%。

2.1.2 碎落台中心位置

在碎落台中心位置距地表深度110、170、230 cm处埋设水分传感器,依次编号2[#]-3、2[#]-2、2[#]-1,其监测结果见图5。

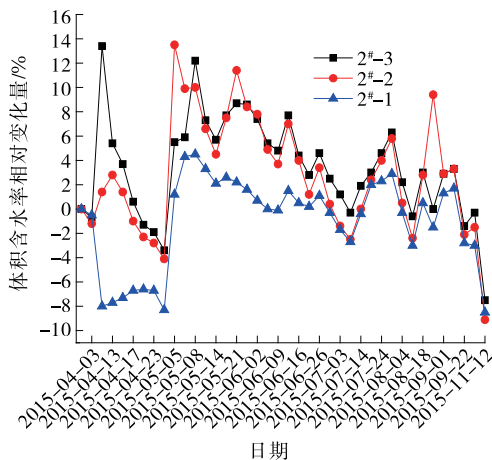


图5 一般挖方路基体积含水率相对变化量与时间的关系 (碎落台中心位置)

由图5可知:1) 4月2[#]-2、2[#]-3含水率均有一定提升,升幅分别约2.5%、13%,2[#]-1则下降约

7%;5月到来前,2[#]-2、2[#]-3含水率逐渐下降,2[#]-1含水率则缓慢增长。主要原因是试验路段碎落台相比硬路肩缺少路面结构的保护,雨水直接作用在上部土体,距离路表更近的土体含水率上升迅速,此时积聚在上部土体的雨水仍未补充下部土体消散的水分。由于渗流的时序性,降雨减少后,下部土体含水率有所提升。2)在5月强降雨季节,不同深度处的含水率比前一期均有较大波动,2[#]-1、2[#]-2、2[#]-3的相对变化量分别约9.6%、17.5%、6.3%。主要是因为大量雨水不仅通过路表垂直入渗路基内部,还流入边坡山体,导致山体边坡水位线上升,靠近山体边坡的碎落台受其影响尤为显著,该区域应做好防排水设施的设计及养护。

2.1.3 硬路肩中心与碎落台中心渗流特性对比

同一深度处的硬路肩及碎落台对应含水率相对变化量对比见图6。

由图6可知:在强降雨季节到来前,碎落台位置含水率受降雨影响反应敏感,硬路肩则表现相对平稳。随着降雨量的增大,两者不同深度处的含水率均较大上升,其中碎落台位置含水率升幅相对更大。在后期降雨量较稳定的时间里,碎落台含水率相对变化量变化剧烈,而硬路肩位置变化较平缓。造成两者差异的主要原因是碎落台靠近山体边坡,其含水率易受山体高势水流和山体地下水位线的影响。此外,硬路肩上层路面结构渗透系数较小,能有效阻隔雨水直接入渗路基,一定程度上起到防排水作用。在研究路基渗流特性时,不管是采用室内试验还是数值模拟方式,都应考虑路面结构层的作用,使研究成果贴近实际状况。

2.2 隧道洞口挖方断面路基渗流特性

2.2.1 距离隧道洞口较远的挖方断面

在距离隧道洞口较远的挖方断面深度110、170、230 cm处埋设水分传感器,依次编号3[#]-3、3[#]-2、3[#]-1,其监测结果见图7。

由图7可知:进入主要雨季,3[#]-1平均含水率变化量约13%,3[#]-2、3[#]-3对应变化量分别约6%和20%,其中几个监测时期3[#]-2含水率波动剧烈。随后的少雨季节,3[#]-3含水率下降速度较快,3[#]-2含水率较平稳,3[#]-1含水率则在一段时间内保持增长。隧道口路基段的渗流特性比一般填、挖方路段更复杂,其湿度不仅受雨水垂直入渗和山体边坡水位影响,还受隧道结构物的间接影响,隧道改变区域内山体水分迁移路线,入渗路径也随之

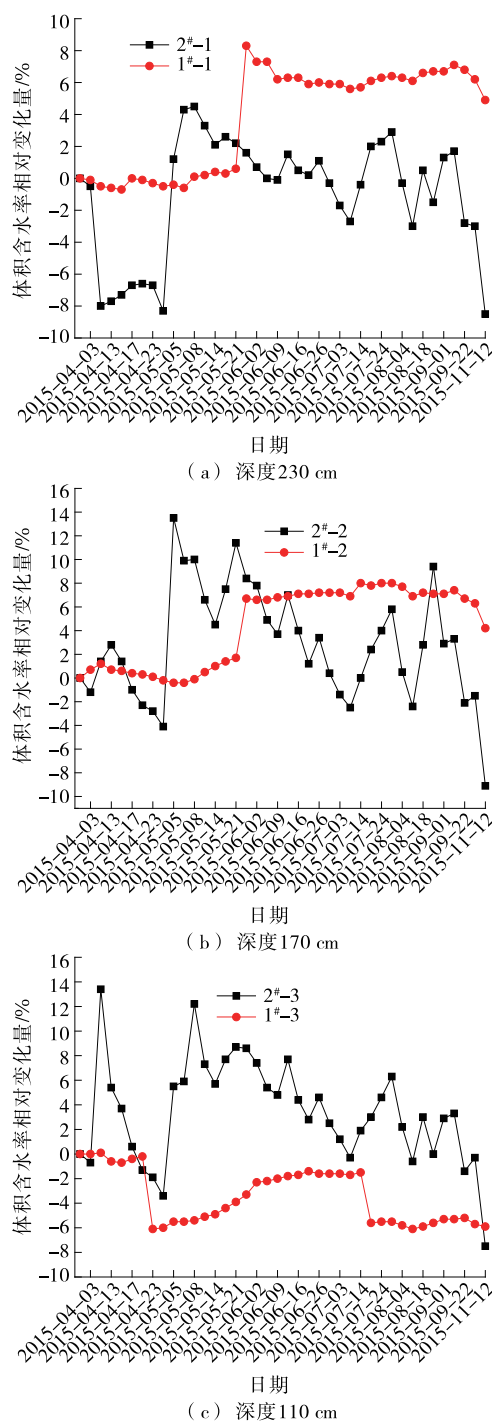


图6 一般挖方路基硬路肩中心与碎落台中心含水率相对变化量对比

产生变化。

为改善隧道排水不畅的问题,在隧道洞口边墙设置仰斜的排水管,出水口位于边沟上方。强降雨季节,除正常雨水外,隧道区域内的部分山体水分也通过排水管流入边沟,若边沟排水不畅,大量积聚的水分容易透过边沟裂缝进入路基内部,使距离路表

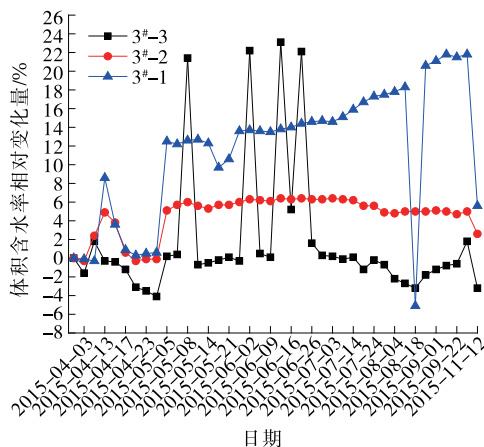


图7 距离隧道洞口较远处挖方路基体积含水率相对变化量与时间的关系

较近的 3[#]-3 含水率出现较大波动。

2.2.2.2 距离隧道洞口较近的挖方断面

在距离隧道洞口较近的挖方断面深度 110、170、230 cm 处埋设水分传感器,依次编号 4[#]-3、4[#]-2、4[#]-1,其监测结果见图 8。

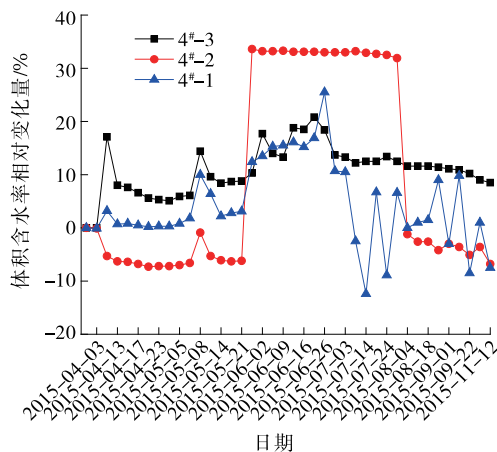
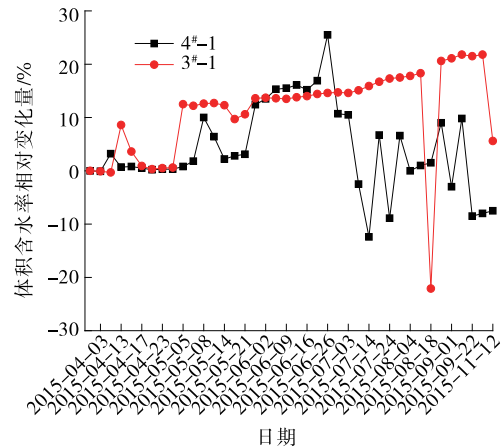


图8 距离隧道洞口较近处挖方路基体积含水率相对变化量与时间的关系

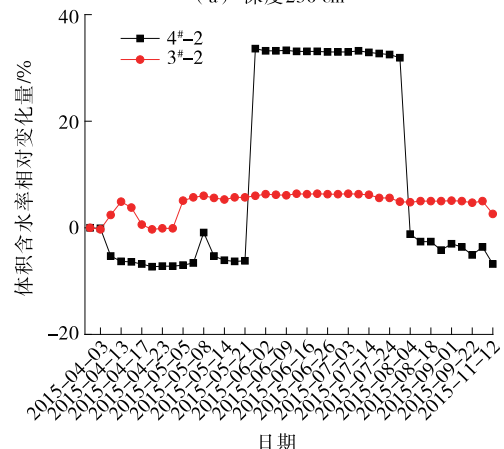
由图 8 可知:在主要雨季到来前,三处的含水率变化趋势相似,但含水率变化幅度不一,其中 4[#]-3 含水率整体上升,4[#]-2 含水率整体下降,4[#]-1 含水率基本平稳。进入雨季,含水率变化均较大,其中 4[#]-2 在 5 月中下旬的含水率比前期增长 28% 左右,且在后期较长时间内维持较高含水率变化量,而 4[#]-3 与 4[#]-1 变化趋势大致相当。由于该断面更靠近隧道口,且该路段岩溶裂隙水较丰富,地下水补给条件好,加上隧道路面排水系统尚不完善,隧道路基路面结构湿度在雨季到来时变化较大,对临近路段含水率有较大影响。

2.2.3 隧道洞口不同截面距离的渗流特性对比

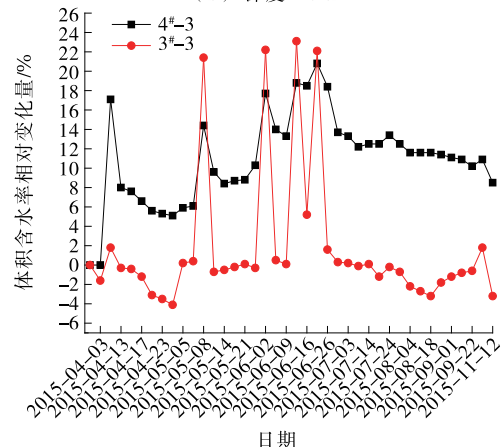
两断面同属隧道口附近路基,考虑到隧道地处水系发达的区域,对两者含水率相对变化量进行对比,结果见图 9。



(a) 深度 230 cm



(b) 深度 170 cm



(c) 深度 110 cm

图9 距离隧道口较近路基与较远路基的含水率相对变化量对比

由图 9 可知:5 月下旬以前,4[#]-1 含水率相对变化量比 3[#]-1 更平稳,而 5 月下旬以后,两者的

情况刚好相反。 $4^{\#}-2$ 与 $3^{\#}-2$ 含水率变化量的变化幅度差别较大, $3^{\#}-2$ 含水率变化量变化幅度维持在6%以内,而 $4^{\#}-2$ 含水率变化量在5月中下旬以后长时间维持在28%左右。距离路表较近的 $3^{\#}-3$ 及 $4^{\#}-3$ 含水率相对变化量的变化趋势大致相同,但 $3^{\#}-3$ 的波动幅度更大。

综上,距离隧道口较近的路基在深度170和230 cm处的含水率波动剧烈,且随着降雨历时、降雨强度变化表现更明显。距离隧道口较远的路基可能由于边沟积水及路面结构损坏等原因,其含水率变化量相对变化更大。

2.3 填方断面路基渗流特性

边坡为一级填方边坡,在硬路肩中心埋设3支传感器,编号 $5^{\#}-1$ 、 $5^{\#}-2$ 及 $5^{\#}-3$,传感器埋设位置含水率相对变化量随时间的变化见图10。

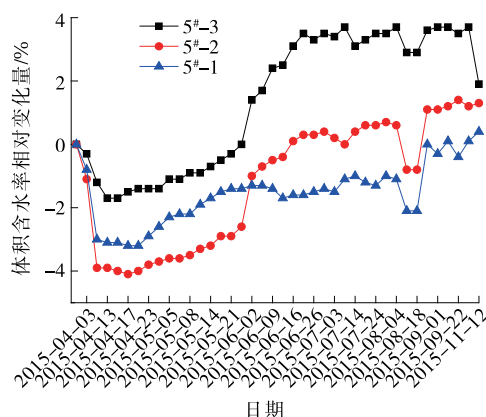


图10 填方路基体积含水率相对变化量随时间的变化

由图10可知:4月8日之前,三处的含水率相对初始值不断下降, $5^{\#}-1$ 、 $5^{\#}-2$ 、 $5^{\#}-3$ 下降幅度分别为3%、3.9%和1.2%。4月8日前虽有小范围连续降雨,但含水率仍呈下降趋势,很大程度上是因为施工影响因素未完全消除。大约从4月20日开始含水率有所上升,且持续到6月中旬, $5^{\#}-3$ 的增幅最大,其次是 $5^{\#}-2$, $5^{\#}-1$ 的增幅最小。说明填方路基在雨季时节,随着路基深度增加,受降雨影响的程度降低。7月以后,即便雨季仍未结束,含水率升幅不大,基本保持稳定。雨季结束,含水率有小幅波动, $5^{\#}-3$ 波动幅度最大,但也仅为2%左右。

纵观多雨季节和少雨季节,填方路基相对挖方路肩,雨水入渗相对含水率的改变量变少,且含水率相对变化量基本保持稳定,对路基湿度的作用由浅往深逐渐削弱。

3 结论

(1) 由于TDR水分传感器埋设施工因素及回填土体对原始路基土体状态的改变,土体含水率观测存在稳定过渡期,在这一时期土体含水率小范围波动后趋于稳定,过渡期一般为1个月左右。

(2) 降雨量带来路基湿度的显著变化,特别在5月强降雨季节,路基增湿明显。强降雨季节路基含水率较大区域集中在深度130~180 cm处,而靠近隧道洞口的路基含水率较大区域在降雨初期集中在深度110 cm附近、在降雨中后期集中在深度130~180 cm处。

(3) 在强降雨季节,含水率波动程度由大到小为隧道口较近、挖方路基碎落台、挖方路基硬路肩、隧道口较远处、填方路基硬路肩。

(4) 隧道口附近路基由于隧道结构对山体水流方向的改变,其水分迁移特性相对一般路基更复杂。

(5) 良好的路面结构能有效阻隔雨水入侵路基内部。碎落台缺乏路面结构的保护,雨水直接作用于路基上部土体,短期内入渗雨水主要积聚在路基上部土体。挖方路基除受雨水从路面直接下渗影响其湿度外,还间接受雨水提升边坡山体地下水水位的影响。挖方路基越靠近山体侧,其相对含水率越容易受山体地下水水位的影响。

参考文献:

- [1] 高冬光.公路与桥梁水毁防治[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [2] 沈水进,孙红月,钟杰,等.基于降雨量等级指数法的公路水毁预警预报[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(5).
- [3] 张磊,苗强强,陈正汉,等.含水率变化对路基回弹模量的影响[J].后勤工程学院学报,2010,26(3).
- [4] 李冬雪,凌建明,钱劲松,等.湿度循环下黏质路基土回弹模量演化规律[J].同济大学学报:自然科学版,2013,41(7).
- [5] 刘文华.降雨入渗条件下非饱和土路基渗流分析[J].中外公路,2013,33(2).
- [6] 夏琼,窦顺,王旭.不同降雨模式下土质路基边坡渗流场研究[J].铁道工程学报,2014(9).
- [7] 穆柯,王选仓,柳志军.基于非饱和渗流原理的路基含水率预估[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(1).
- [8] 赵明华,刘小平,何伟.非饱和土路基降雨渗流分析[J].公路交通科技,2009,26(3).

(下转第86页)

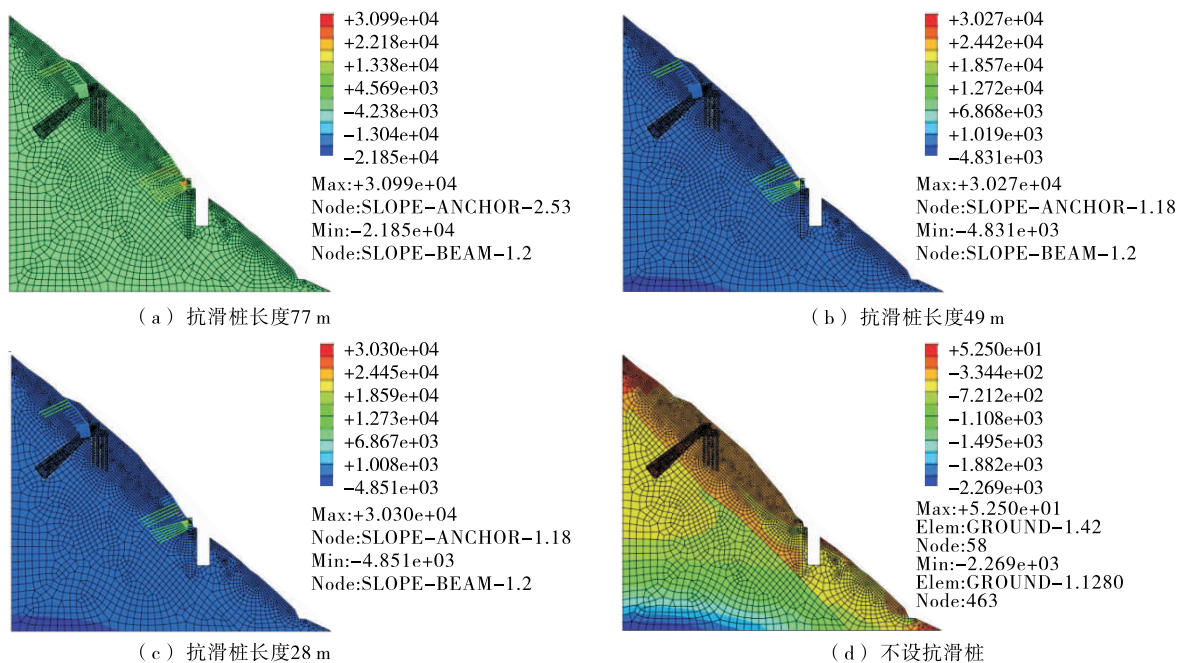


图 11 金沙江特大桥丽江岸边坡桥墩基坑开挖导致的锚杆应力(单位:kPa)

(3) 抗滑桩越长,边坡水平位移和竖向位移越小,抗滑桩能抑制边坡的水平 and 竖向位移。

(4) 抗滑桩长度对锚杆内力影响最大,抗滑桩越长,锚杆内力越大。

参考文献:

- [1] GB/T 50218—2014,工程岩体分类标准[S].
- [2] GB 50330—2013,建筑边坡工程技术规范[S].
- [3] 肖国峰,冯光乐,陈从新,等.硬岩中倾顺层边坡变形特征和破坏机制分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊2).
- [4] 贾昊冉,黎志恒,伦国星,等.岩体结构对工程滑坡稳定性的影响分析[J].兰州大学学报:自然科学版,2015,51(6).
- [5] 赖国泉,任庆钊,张俊德.甘肃兰州某黄土建筑高边坡失

稳原因及补强治理方案[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(1).

- [6] 吴伟.露天边坡失稳原因分析及预防与治理[J].采矿技术,2011,11(5).
- [7] 张季如.边坡开挖的有限元模拟和稳定性评价[J].岩石力学与工程学报,2002,21(6).
- [8] 刘波,黄卫.基于极限平衡理论的边坡稳定性分析方法对比研究[J].工业建筑,2014,44(增刊).
- [9] 王玉平,曾志强,潘树林.边坡稳定性分析方法综述[J].西华大学学报:自然科学版,2012,31(2).
- [10] 李虎.跨越陡坡峡谷桥梁大体积基坑开挖边坡稳定性研究[D].湘潭:湖南科技大学,2017.
- [11] 王聪聪,李江腾,廖峻,等.抗滑桩加固边坡稳定性分析及其优化[J].中南大学学报:自然科学版,2015,46(1).

收稿日期:2018-05-07

(上接第 81 页)

- [9] 阙云,杨龙清,胡昌斌,等.多雨地区路基湿度季节变化特征的现场监测[J].公路,2010(12).
- [10] 彭建岚.基于 TDR 原理的红粘土路基含水率监测方法[J].公路工程,2011,36(3).
- [11] 潘宗俊,谢永利,文明勇,等.基于 TDR 技术的水分测量系统量测膨胀土含水量偏差分析[J].公路交通科技,2009,26(7).
- [12] 谢琳,曾铃,史振宁.考虑路堤渗流场变化的最佳包边土厚度数值研究[J].公路与汽运,2017(4).

- [13] 时雨.红土的湿化效应及路堤变形试验研究[D].南昌:南昌大学,2017.

- [14] 王成皿,兰天,刘龙武.深层水毁防治技术在花岗岩残积土路基边坡中的应用研究[J].公路与汽运,2017(2).
- [15] 王东明.多雨山区路基路面渗流特性及排水方案研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [16] 谢世有.降雨条件下山区公路路基水分运移特性研究[D].广州:华南理工大学,2016.

收稿日期:2018-03-29