

文章编号:1673-9469(2022)02-0059-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.02.009

基于监测数据的硬质岩路堑边坡地下水分布特征与 防渗效果评价

赵仲珩, 陈志坚*

(河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对地下水影响岩质边坡的安全稳定的问题, 以开挖深度约200 m的连云港中云台山路堑边坡左坡为研究对象, 通过计算分析地下水监测数据, 对路堑边坡左坡的地下水分布开展研究并评价开挖坡面细石混凝土喷层的截渗效果。结果表明, 边坡地下水补给来源为降雨入渗, 边坡南端废弃采石场为主要排泄区; 埋设渗压计的四个平台间存在较强水力联系; 渗流量高的区域细石混凝土喷层老化破损比其他区域高, 但整体上细石混凝土喷层的截渗效果较好。

关键词: 硬质岩; 路堑边坡; 地下水监测; 边坡稳定性

中图分类号: TU42

文献标识码: A

Evaluation of Underground Water Distribution Characteristics and Seepage Prevention Effect of Hard Rock Cutting Slope Based on Monitoring Data

ZHAO Zhongheng, CHEN Zhijian*

(College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: In view of the influence of groundwater on the safety and stability of rock slope, taking the left cutting slope with excavation depth of about 200 m of zhongyuntai mountain, Lianyungang as the research object, the groundwater distribution on the slope was studied and the seepage interception effect of fine aggregate concrete spray layer on the excavated slope was evaluated through calculation and analysis of groundwater monitoring data. The results show that the groundwater supply source of the slope is rainfall infiltration and the abandoned quarry at the south end of the slope is the main discharge area. There is a strong hydraulic connection between the four platforms where the osmometer is embedded. The aging damage of the fine aggregate concrete spraying layer in the area with high seepage flow is higher than that in other areas, but on the whole, the seepage interception effect of the fine aggregate concrete spraying layer is better.

Key words: hard rock; cutting slope; groundwater monitoring; slope stability

随着我国现代化建设的发展, 工程边坡的数量与日俱增。这些边坡的稳定性关系着工程的成败与人民的生命财产安全。影响边坡稳定的因素复杂多样, 而水的作用是边坡稳定性评价中不可忽视的重要因素, 地下水的赋存与运移往往成为边坡失稳的诱发因素^[1-2]。对于岩质边坡, 地下水补给来源为降雨入渗补给且主要赋存于各类裂隙

中, 地下水对岩质边坡稳定的影响更为关键。岩质边坡相较于土质边坡在物质构成上并无本质区别, 但岩质边坡中存在大量的裂隙、节理、断层等结构面, 具有明显的结构性, 其稳定性相较于受岩性影响外, 更受到岩体结构的控制^[3]。边坡岩体在多种外营力共同作用下发生渐进性演变, 而降水和地下水作用是促进这一过程的核心因素^[4]。

收稿日期: 2022-01-26

基金项目: 江苏省政策引导类计划项目(BY2015002-05)

作者简介: 赵仲珩(1997-), 男, 湖北仙桃人, 硕士研究生, 从事地质体稳定与变形监测研究。

* 通讯作者: 陈志坚(1963-), 男, 福建福清人, 博士, 教授, 主要从事地质工程、岩土工程的教学研究工作。

地下水对岩质边坡的作用可以概括为几个方面^[5-9]:(1)水-岩物理化学作用;(2)静水压力;(3)动水压力;(4)岩土体及结构面的软化;(5)岩土体含水量和容重的增大。周志芳等^[10]分析了次降雨下地下水动态资料,计算得到的边坡稳定系数随地下水位同步变化且迟后于降雨。曾芮等^[11]通过数值模拟得出:强降水作用使得岩体后缘裂隙快速充水,对岩体产生向外推力,是岩体崩塌倾覆破坏的重要直接诱因。张勃成等^[12]将计算模型与实例结合,论述了水力作用是诱发边坡失稳的重要因素。

对于某些地质条件复杂的边坡,边坡内部力学作用复杂,加上降雨等环境因素的影响,边坡岩土体的力学参数和稳定状态并非一成不变的,从而难以确定,边坡安全监测在边坡工程中具有重要意义^[13]。沈强等^[14]分析抗滑桩加固边坡的监测成果,发现边坡形成了第二滑动面,并指出较大变形出现在雨季。陈强等^[15]通过对公路边坡的测缝计、地下水位数据分析,验证了地下水对边坡稳定的影响,判断边坡存在滑坡危险。为此,依托连云港中云台山路堑左坡岩质高边坡喷锚支护工程开展实测研究。

1 工程概况

中云台山路堑左边坡开挖坡面产状为 NE52°/NW∠55°,高速公路从一垭口处横穿中云台山山脉,路面标高 15~17 m,路左侧山顶标高 289.2 m。本文研究的左坡 2010 年 6 月开挖完成,人工坡高(即开挖深度)约 200 m、总体坡度为 42.4°。边坡布置 20 级台阶,每级坡高 10 m,除第一级台阶坡度为 76°,第二级台阶坡度为 49°外,从第二至十九级台阶坡度均为 55°,台面宽度为 3 m(其中有 4 个平台台面宽度为 9 m),如图 1 所示。

左边坡于 2010 年 6 月完成开挖和坡面喷锚支护,岩体岩性以二长浅粒岩为主,属坚硬岩。中云台山路堑段并无明显的断层标志和现象,主要软弱结构面为绿泥片岩夹层,主要结构面为片理面和构造裂隙。岩体发育有片理,片理产状 NE40°~60°/SE∠10°~30°。边坡夹有数条绿泥片岩软弱夹层(间距大约 30~50 m),产状 NE15°/SE∠28°,在边坡中起隔水作用。

岩体发育的裂隙主要有 3 组: I 组: NW300°~320°/NE, SW∠70°~88° 陡倾角裂隙,走向与坡面近正交,属陡倾角大裂隙,延伸几十米到几百米,

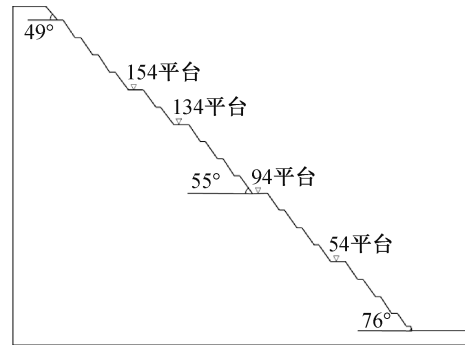


图 1 左边坡坡度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the left-side slope

而且切割深、裂隙面平直、产状稳定、多呈微张到闭合、无充填,它控制了区内天然边坡陡坎和危岩的分布; II 组: NE30°~40°/NW、SE∠70°~88° 陡倾角裂隙,走向与坡面近平行,倾向坡内或坡外,作为主要裂隙,其规模相对较小,延伸长度多在十几米到几十米,左边坡两侧为废弃采石场,可见其切割深度几米到十几米,其间距也较 I 组大,沿裂隙面存在蚀变现象,在地表多表现为冲刷深槽,深槽宽度可达 30~40 cm,深度可达 1~3 m,可见该组裂隙对岩体结构、抗冲蚀和风化能力以及岩体透水性影响较大; III 组: NE10°~20°/NW∠36°~45° 压性小断层,走向与坡面近平行,倾向坡外,属倾向坡外的顺向结构面,在坡面稀疏分布,间距 60~70 m。

路堑边坡左坡地下水系统靠降雨入渗补给。开挖坡面经细石混凝土喷护并设有排水孔,各级平台均设有截排水沟,左坡主要补给途径为上部天然坡面残坡积层与强风化带孔隙水下渗补给、陡倾角裂隙直接下渗补给。基岩裂隙发育, NW 向裂隙为地下水向下渗流提供了有利条件,下渗地下水渗流至反倾绿片岩夹层处,地下水向下运移受阻,在绿片岩夹层顶部富集后易沿 NE 向裂隙向边坡两端渗流并排泄于边坡两侧的天然坡面,尤其是南端废弃采石场开挖面。在 2020 年 1 月现场调查中,对坡面排水孔渗水情况和坡面混凝土喷层水迹的调查结果符合上述边坡地下水渗流与排泄特征。

2 地下水监测技术与测点布置

由于边坡高陡,且存在结构面不利组合,地下水往往是边坡稳定性的重要控稳因素之一,为防止掉块产生的落石危害高速公路安全运营,地下水及渗透压力监测是路堑边坡的重要监测内容。

前文已论述该边坡地下水的分布和渗流严格受控于 NW 向陡倾角裂隙、NE 向陡倾角裂隙和倾向坡内的绿片岩夹层,为确保监测质量,采用在绿泥片岩上部布置斜向观测孔的方法,左边坡地下水监测系统设有 12 套渗压计,具体情况见表 1、图 2、图 3。

其中,渗压计采用美国基康公司生产 GK4500—350 kPa 型振弦式渗压计,传感器长 133 mm,直径为 19.1 mm 量程为 35 m 水头压力,最小灵敏度为 0.025% F.S.,精度为±0.1% F.S.,工作温度为-20℃~+80℃可同时自动观测不同深度的地下水渗透压力和地下水温度,传感器所在位置测得压力可换算成等压力水柱高度再换算为地下水位高程^[16],计算公式为:

$$H = \frac{G \times (f_0^2 - f_i^2) + K \times (t_i - t_0)}{9.8} + H_0 \quad (1)$$

式中: G 为渗压计率定系数, m/Hz^2 ; K 为温度修正系数, $m/^\circ C$; f_0 为传感器埋设时初始频率, Hz ; f_i 为第 i 时刻时实测频率, Hz ; t_0 为传感器埋设时初始

温度, $^\circ C$; t_i 为第 i 时刻时实测温度, $^\circ C$; H_0 为渗压计初始埋设高程, m 。

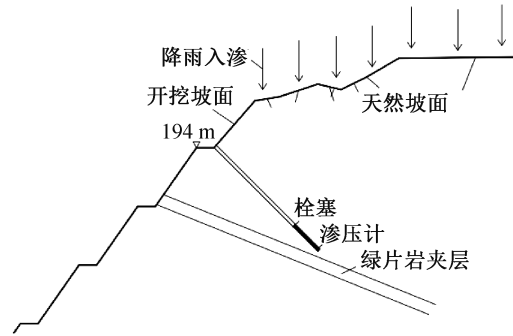


图 2 斜向布置渗压计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of inclined layout of pressure meter

3 地下水位实测结果分析

取 2018 年 10 月 9 日—2019 年 10 月 8 日的监测数据进行计算,结果见表 2,下面将对各平台监测数据进行分析。

表 1 渗压计布置情况表

Tab. 1 Layout table of pressure meter

所在平台	测点编号	孔口高程/m	孔径/mm	孔深/m	入孔深/m	孔倾角/(°)	渗压计埋设高程/m
194	SYL1941	194.5	90	25	23.75	45	177.71
	SYL1341	135.0	90	25	21.31	22	127.02
134	SYL1342	135.0	90	25	19.15	43	121.94
	SYL1343	135.0	90	25	22.50	42	119.94
94	SYL941	95.0	90	25	25.00	41	78.60
	SYL942	95.0	90	25	23.10	45	78.67
	SYL943	95.0	90	25	23.60	44	78.61
	SYL944	95.0	90	25	25.90	44	77.01
54	SYL541	55.0	113	25	25.00	55	34.52
	SYL542	55.0	113	25	25.00	55	34.52
	SYL543	55.0	113	25	25.00	55	34.52
	SYL544	55.0	113	25	25.00	55	34.52

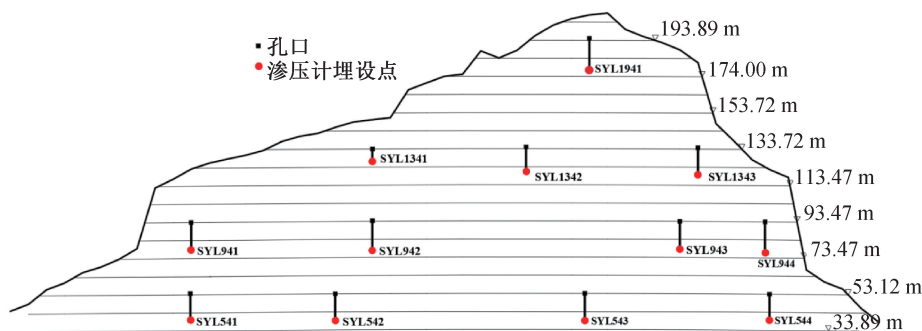


图 3 渗压计分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of distribution of pressure meter

表 2 各测点监测期内地下水位动态

Tab. 2 Groundwater level dynamics during the monitoring period of each measurement point

测点 编号	渗压计埋设 高程/m	监测期平均 水位/m	监测期最高 水位/m	监测期最低 水位/m
SYL1941	177.71	183.48	187.59	181.61
SYL1341	127.02	133.89	134.02	133.64
SYL1342	121.94	131.94	135.63	130.53
SYL1343	119.94	128.98	131.72	126.00
SYL941	78.6	77.63	77.66	77.58
SYL942	78.67	85.64	90.26	83.55
SYL943	78.61	81.90	81.98	81.86
SYL944	77.01	76.95	77.06	76.81
SYL541	34.52	41.48	41.51	41.48
SYL542	34.52	53.03	35.59	35.36
SYL543	34.52	37.25	37.37	37.13
SYL544	34.52	36.76	40.72	34.00

194 平台为路堑边坡中最高开挖坡面平台,靠近边坡顶部大面积的天然坡面,易受上部天然坡面残坡积层与强风化带孔隙水下渗补给,地下水位受大气降水影响明显,全年地下水位变化幅度达 5.97 m。在 2021 年 12 月的现场调查中发现细石混凝土出现老化破损,喷层出现隆起、剥落,坡面裂缝发育且被钙质析出物充填,裂缝渗水痕迹明显,如图 4 所示,坡面细石混凝土喷层的老化破损率呈现逐年增大趋势,混凝土喷层架空、喷层下石渣淘蚀问题逐渐显现,降雨入渗补给和坡内渗流作用增强,不利于路堑边坡稳定。



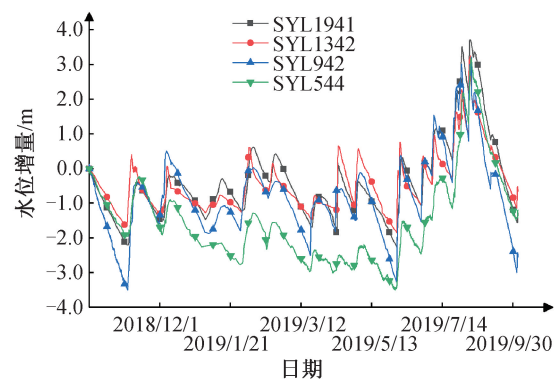
图 4 194 平台开裂坡面

Fig. 4 194 cracking slope of the platform

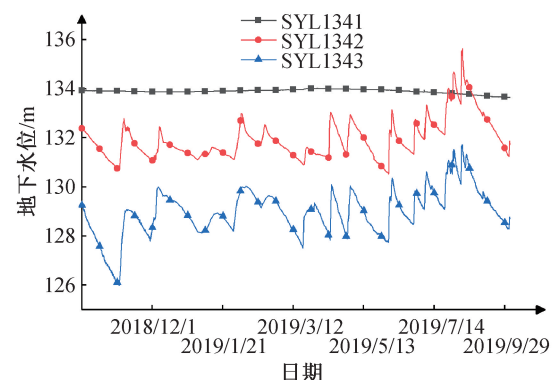
统计各平台渗压计监测期水位增量,如图 5 (a) 所示,对路堑边坡垂向地下水特征进行研究。在降雨量较少的 2018 年 10 月—2019 年 5 月,各平台地下水位整体呈下降趋势,路堑边坡中部绿片岩夹层与 NE 向结构面发育,地下水易于沿结构面水平向运移向废弃采石场天然坡面排泄,故 SYL942 测点地下水下降速度较快,下降量明显

大于其他平台测点。在 2019 年 6 月—8 月丰水季断续性长历时强降水影响下,各监测点地下水位呈上升趋势,在连续降雨后地下水位明显抬升,且各平台地下水位增长与降雨存在有规律的滞后,距离天然坡面越远的监测点,其滞后时间越长,而雨后,地下水位能够较快消散,说明边坡内部排水通畅。这表明了中下部坡面细石混凝土喷层完整度高,截渗能力强,坡内地下水主要接受坡面降雨入渗和边坡上部地下水径流补给,边坡中下部测点受边坡上方地下水径流影响明显,坡体内以 NW 向陡倾角裂隙为主的垂向的渗流通道顺畅。

134 平台分别在边坡北部、中部、南部埋设 SYL1341、SYL1342、SYL1343 测点,监测边坡 120~134 m 部分地下水位变化,如图 5 (b) 所示,故以 134 平台测点为例,对路堑边坡水平方向地下水特征进行研究。图 5 结果表明,该平台北侧的地下水渗透压力水头高程高于南侧,北部监测点地形陡峻且远离坡顶的天然坡面,由于锚喷细石混凝土的截渗作用,该区域地下水位受大气降水的影响极弱,整个水文年地下水位均较稳定,表明锚喷细



(a) 四平台测点水位增量曲线



(b) 134 平台测点地下水位曲线

图 5 边坡地下水位变化图

Fig. 5 Variation diagram of slope groundwater level

石混凝土阻隔了大气降水入渗坡体的通道,地下水整个监测期均处于稳定状态,这对边坡稳定是极其有利的。SYL1342、SYL1343 测点全年地下水位变化趋势一致,且中部测点地下水位始终高于南部测点约 3 m,这与片理的产状分布相一致。SYL1343 监测期内地下水变化幅度为 5.72 m 高于 SYL1342 的 5.10 m,且 SYL1343 拥有更快地下水位变化速度,这表明了:南部废弃采石场天然坡面为路堑边坡重要的地下水排泄区域;边坡越靠近南部,地下水渗流越大。根据路堑边坡勘察报告,路堑边坡南采石场天然坡面 NE 向裂隙发育,岩石破碎、铁锰质渲染明显,这与上述结果吻合。

94 平台除 SYL942 测点外,其余测点远离排泄区域和能够接受降雨入渗补给的天然坡面,地下水位受大气降水的影响表现为明显的季节性,与短历时降雨过程的相关性较弱,而雨后的地下水位消散过程缓慢,且表现为季节性消散,SYL942 位于 SYL1342 正下方,两测点间水力联系强,边坡中部存在大渗流量的垂向渗流通道,推测为路堑边坡南部 54~124 m 高程的边坡岩体存在倾倒变形现象,边坡岩体透水性增强,地下水不易大量聚集。总体上看 94 平台细石混凝土喷层截渗能力强,对边坡稳定有利。

54 平台测点监测结果与 134 平台相似,平台北部、中北部与中南部测点远离路堑边坡外围的天然坡面,细石混凝土锚喷防护截渗后,该区域地下水受大气降水影响很小,地下水位较稳定。SYL544 测点因临近路堑边坡南侧采石场且测点分布高程已低于南侧废弃采石场底部,故该区域地下水位受大气降水影响明显,细石混凝土喷层完整度高,截排水效果好,有利于坡脚的安全稳定。

4 结论

1)路堑边坡地下水主要接受降雨入渗补给,边坡顶部天然坡面、上部平台及南侧容易接受降雨入渗补给,降雨后各平台地下水增长存在规律性滞后,越低的平台降雨过后,路堑边坡内部地下水位越能够快速消散,表明路堑边坡内部排水通畅。

2)路堑边坡、远离路堑边坡轮廓线的区域,地下水位受大气降水的影响表现为明显的季节性,与降雨过程较弱,据此判断,这些区域的坡内地下水主要接受边坡上部地下水径流补给。

3)本监测期降雨量较少,结合十年来的监测

数据,判断左边坡坡面以下约 30 m 深度范围为透水性强,虽然路堑边坡地下水贫乏,但在丰水季节,边坡约 30 m 深度范围内仍间歇性赋存丰富的地下水。即使地下水贫乏,渗透压力仍对边坡变形产生较大影响

4)路堑边坡南部的地下水位变化受路堑边坡南侧外围天然坡面降雨入渗和废弃采石场排泄作用的影响显著,降雨后,地下水位能够快速消散,表明边坡渗流通道发育,这对位于其下方的 84~124 m 高程平台之间的三角体抗滑稳定是不利的。

5)虽然路堑边坡细石混凝土喷层整体上较完整,整体截渗、排水能力较好,但渗流量较大的 194 平台、134 平台南端等区域坡面喷层老化破损率逐年上升,部分坡面出现喷层隆起、剥落,长期来看不利于地下水位的稳定和边坡的安全,应继续加强对边坡地下水渗透压力的监测。

参考文献:

- [1]孙玉科,姚宝魁.我国岩质边坡变形破坏的主要地质模式[J].岩石力学与工程学报,1983(1):67-76.
- [2]齐甦,彭少民.国内外滑坡防治与研究现状综述[J].地质勘探安全,2000(3):16-19.
- [3]宋桂龙,裴大伟,孟强,等.边坡分类体系及其与稳定性关系探讨[A].中国水土保持学会工程绿化专业委员会、交通部公路科学研究院、北京林业大学.全国公路生态绿化理论与技术研讨会论文集[C].中国水土保持学会工程绿化专业委员会、交通部公路科学研究院、北京林业大学:中国水土保持学会,2009:8.
- [4]徐则民.基于失稳机制的岩质路基边坡加固方案优化[J].中国公路学报,2008(6):7-13.
- [5]HAWKINS A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of Sandstone Strength and Deformability to Changes in Moisture Content[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1992,25(2):115-130
- [6]何满潮,姚爱军,鹿粗,等.边坡岩体水力学作用的研究[J].岩石力学与工程学报,1998(6):662-666.
- [7]邓华锋,李建林,王兴霞,等.岩体边坡中地下水作用的探讨[J].灾害与防治工程,2004,57(2):30-34.
- [8]黄涛,罗喜元,邬强,等.地表水入渗环境下边坡稳定性的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004(16):2671-2675.
- [9]王家全,常志凯,林桂武,等.地下水对管廊基坑岩质边坡稳定性的影响研究[J].水力发电,2021,47(7):43-47+59.
- [10]周志芳,龚友平.地下水对边坡稳定性作用的动态效应[J].勘察科学技术,1990(4):14-19.

(下转第 79 页)

- [6] Ng C W W, LIU G B, LI Q. Investigation of the Long-Term Tunnel Settlement Mechanisms of the First Metro Line in Shanghai[J]. Can Geotech J, 2013, 50(6): 674-684.
- [7] 黄广龙, 卫敏, 韩爱民, 等. 南京长江漫滩地层中地铁结构的沉降分析[J]. 水文地质工程地质, 2006(3): 118-122.
- [8] 黄广军. Asaoka 法预测软土地基沉降时存在的问题和对策[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1061-1065.
- [9] 杨涛, 李国维, 杨伟清. 基于双曲线法的分级填筑路堤沉降预测[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 4.
- [10] 赵新铭, 刘浩, 杨涛, 等. 淤质泥土堤防沉降预测方法的对比分析[J]. 人民长江, 2016, 047(17): 93-97.
- [11] 潘林有, 谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. 岩土力学, 2004(7): 45-50.
- [12] TB 10304—2020, 铁路隧道工程施工安全技术规程[S].
- [13] 梅国雄, 宋林辉, 宰金珉. 地下水浮力折减试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1476-1480.
- [14] DBJ 11-501—2009, 北京地区建筑地基基础勘察设计规范[S].
- [15] 孙红, 赵锡宏, 杨群兴. 软土的弹塑性损伤模型在 Biot 固结有限元中应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 4.
- [16] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 141-153.
- [17] GB/T 51064—2015, 吹填土地基处理技术规范[S].

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 63 页)

- [11] 曾芮, 姜明顺, 孙琳旭, 等. 强降雨条件下岩质边坡倾倒崩塌破坏机理——以鄂西赵家岩崩塌为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 12-17.
- [12] 张勃成, 唐辉明, 申培武, 等. 基于岩石损伤与水力作用的顺层岩质边坡临界失稳高度研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2): 42-49.
- [13] 张金龙, 徐卫亚, 金海元, 等. 大型复杂岩质高边坡安全监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1819-1827.
- [14] 沈强, 陈从新, 汪稔, 等. 边坡抗滑桩加固效果监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(6): 934-938.
- [15] 陈强, 韩军, 艾凯. 某高速公路山体边坡变形监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(2): 299-302.
- [16] 陈志坚, 刘大伟, 张雄文. 水压力传感器系统在河床冲刷深度实时监控中的应用研究[J]. 中国工程科学, 2007(5): 17-21.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 70 页)

- [7] 聂利芳, 王新国, 周继, 等. 考虑温度效应的混凝土索塔锚固段应力分析[J]. 公路, 2019, 064(4): 110-114.
- [8] 念良宏, 王龙, 张柳煜. 寒潮作用对混凝土 T 梁的影响[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2019(1): 174-176.
- [9] 孙国富. 大跨度钢管混凝土拱桥日照温度效应理论及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [10] 汪鹤. 钢管混凝土拱桥日照温度场及效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [11] 姜自奇, 刘兵伟, 陈艳阳, 等. 变截面钢管混凝土桁架拱桥拱脚应力分析及抗裂预防措施[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 180-184.
- [12] 汪基伟, 唐亮, 范家怡, 等. 带埋置弹簧界面单元模型研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2019, 47(2): 125-130.
- [13] 巫昌海, 汪基伟. 混凝土三维钢筋布置组合式有限单元模型及其网格自动生成[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(10): 761-764.
- [14] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [15] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [16] DL/T 5057—2009, 水工混凝土结构设计规范[S].
- [17] GB 51177—2016, 升船机设计规范[S].

(责任编辑 周雪梅)