文章编号:1005-0523(2022)01-0029-11

动载作用下SPSC-AC抗滑结构的弯矩分配规律研究

郑明新[1,2],任勇江[1,2],郭 锴[1,2],熊 浪[1,2],杨婧雯[1,2]

(1.华东交通大学交通运输工程学院,江西 南昌 330013;2.华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室,江西 南昌 330013)

摘要:将围桩-土拱弦式耦合抗滑结构(SPSC-AC)用于高速铁路路基蠕滑工程防治设计,有必要开展在列车动荷载下各个围桩的弯矩分配规律研究。在某高铁路基过渡段蠕滑机理和变形特征研究基础上,利用Midas/GTS NX建立SPSC-AC治理的路基-桥墩-边坡三维数值模型,采用非线性动力时程+有限元强度折减法,分析SPSC-AC的治理效果,探讨在不同列车速度的动载作用下SPSC-AC弯矩特征和分配规律,提出优化建议。结果表明:SPSC-AC主控围桩间距在4d布置形式下,各围桩桩身弯矩值的分布大致成反S形分布;在一定速度下,各围桩桩身最大弯矩值随时间的变化基本一致,呈"简谐波"状;随着列车行驶速度的增大,稳定阶段的围桩弯矩值也随之增大;一定速度下的稳定阶段各围桩弯矩值表现为R1#桩>R3#桩>R2#桩>R8#桩>R4#桩>R7#桩>R5#桩>R6#桩。各围桩的弯矩分配比例是R1#桩为1.00,R3#桩为0.51,R2#桩为0.46,R8#桩为0.46,R4#桩为0.39,R7#桩为0.33,R5#桩为0.31,R6#桩为0.29。研究结果可为高速铁路路基蠕滑防治工程设计提供依据。

关键词:蠕滑路基;列车动载;围桩-土耦合;抗滑结构;弯矩分配

中图分类号:U213.1+5;TG473 **文献标志码**:A

本文引用格式:郑明新,任勇江,郭锴,等. 动载作用下SPSC-AC抗滑结构的弯矩分配规律研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(1):29-39.

Study on Moment Distribution Law of SPSC-AC Anti-Sliding Structure under Dynamic Load

Zheng Mingxin[1,2], Ren Yongjiang[1,2], Guo Kai[1,2], Xiong Lang[1,2], Yang Jingweng[1,2],

(1. College of Communication and Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: It is necessary to understand the bending moment distribution law of each surrounding pile, especially under the dynamic load of train, when the surrounding pile-soil arch chord coupling anti-sliding structure (SPSC-AC anti-sliding structure) is used in the control design of creep of high speed railway subgrade. Based on the study of creep mechanism and deformation characteristics of subgrade in a bridge-tunnel transition section of the express railway, a three-dimensional numerical model of subgrade creep protected by SPSC-AC anti-slide structure was established by using Midas/GTS NX,and the non-linear dynamic time course + finite element strength reduction method is adopted to analyse the governing effect of the SPSC-AC anti-slid structure and explore the bending moment characteristics and distribution of the SPSC-AC anti-sliding structure under the dy-

收稿日期:2021-09-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51568022);江西省自然科学基金重点项目(20202ACB202005);江西省研究生创新资金项目(YC2021-S435)

namic load of different train speeds,and suggesting optimisations.The result shows: Spacing 4*d* arrangement of main control surrounding piles of the SPSC-AC anti-sliding structure, The distribution of bending moment value of each surrounding pile is roughly in the shape of inverse S; At a certain speed, the variation of the maximum bending moment of each surrounding pile with time is basically the same, showing the shape of "simple harmonic"; With the increase of train speed, the bending moment of surrounding pile in stable stage also increases;At a certain speed, the bending moment of each surrounding pile in the stability stage is No.1 pile > No.3 pile > No.2 pile > No.8 pile > No.4 pile > No.7 pile > No.5 pile>No.6 pile ; The bending moment distribution ratio of each enclosure pile is 1.00 for No.1 pile, 0.51 for No.3 pile, 0.46 for No.2 pile, 0.46 for No.8 pile, 0.46 for No.4 pile, 0.33 for No.7 pile, 0.31 for No.5 pile and 0.29 for No.6 pile. The research results can provide a basis for the engineering control design of subgrade creep prevention of high-speed railway.

Key words: subgrade creep; train dynamic load; surrounding pile-soil coupling; anti-slide structure; moment distribution

Citation format:ZHENG M X,REN Y J,GUO K,et al. Study on moment distribution law of SPSC-AC anti-sliding structure under dynamic load[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(1):29-39.

高速铁路对线路的平顺性、稳定性和安全性有很高的要求,铁路边坡失稳将严重影响高速铁路的正常运营。一些学者对铁路路基边坡的支挡结构进行了研究,如向俐蓉等[1]通过现场监测对抗滑桩-桩板结构治理铁路滑坡的受力机制进行了研究。肖成志等[2]通过室内模型试验研究了加筋土挡墙在循环荷载下的力学性能。Qiao 等[3]基于现场监测和数值模拟研究了门架式抗滑桩加固路堤边坡的结构行为。Duan 等[4]探讨了“抗滑桩+支撑柱”在滑坡推力作用下的力学特性。Wang 等[5]采用数值模拟的方法研究了“上挡式”抗滑桩加固下隧道开挖与边坡位移的相互作用机理。Zhang 等[6]通过足尺试验研究了滑坡对桥梁桩基的影响,研究表明抗滑桩的荷载传递和滑坡的牵引会引起桥梁桩基的变形,危及上部桥梁的安全。蔺鹏臻等[7]通过建立边坡-桥台-桩基系统三维数值模型,研究了在地震和列车荷载作用下边坡桩基的力学特性。王祥[8]通过监测对微型桩治理铁路滑坡进行了效果分析,表明在地形受限情况下微型桩具有很好的治理效果和适应性,但测斜管显示工后位移和沉降较大,接近 30 mm。

上述抗滑支挡结构都是针对铁路边坡滑动方向垂直于路线方向在铁路两侧设置。而当铁路边坡顺高速铁路路线方向滑动时,坡体上有路堤、桥梁墩台等结构物,其对变形控制的要求高,倘若出现一定的变形或位移量则路堤蠕滑控制失败。普通“微型桩群”治理在桩顶变形较大,不能真正形成桩-土耦合并发挥土自身强度[9-10]。

郑明新等[11]通过现场监测、室内试验和数值分析等手段揭示了合福高铁某桥-隧过渡段路基边坡的变形特征及蠕滑机理。Zheng 等[12]揭示研究路段蠕滑是由于雨水下渗、全风化云母片岩层崩解软化而导致路基蠕滑,在列车循环荷载作用下蠕动加剧。郑明新[13]在围桩-土耦合式抗滑桩的基础上提出了针对高铁蠕滑路基实现高铁桥墩、桥台“零位移”的围桩-土拱弦式耦合抗滑结构(SPSC-AC)。胡国平[14]开展了围桩-土拱弦式耦合抗滑结构的静力模型实验,探讨了该结构的桩-土耦合效应和受力特点。理论上该结构继承并发扬了围桩-土耦合式抗滑桩的优点,对于不适合大开大挖及防护后位移极其苛刻的高铁路基防护具有很高的应用价值。但以往研究侧重于对结构在静力荷载作用下最优布置形式的研究,而对列车荷载循环动力荷载下桩身弯矩的分配情况尚需开展深入探讨。

鉴此,以某桥-隧过渡段蠕滑路基[11-12]为依托,建立 SPSC-AC 抗滑结构防护下的路基-桥墩-边坡三维数值计算模型,采用非线性时程+有限元强度折减法分析方法,分析 SPSC-AC 抗滑结构的治理效果,探讨围桩-土拱弦式耦合抗滑结构在列车循环荷载作用下的桩身弯矩分配规律,为类似工点治理设计提供参考。

1　数值模型建立

1.1　模型尺寸

为了与实际情况更加吻合，建立较为准确的数值模型来进行模拟。路基结构层从上至下依次为 0.2 m 厚 CRTSⅡ型轨道板、0.03 m 厚 CA 砂浆层、0.3 m 厚支撑层、0.4 m 厚级配碎石+5%水泥的基床表层、2.3 m 厚 5%水泥改良土的基床底层、2 m 厚 AB 组填料路基本体，此外还有梯形坡率 1:2 的级配碎石+5%水泥的台后填土地基采用 CFG 桩加固。本次过渡段路基蠕动治理采用围桩–土拱弦式耦合抗滑结构，根据实际勘察裂缝发育情况及其存在软弱土蠕滑带并设置厚度为 0.5 m，利用有限元软件 Midas/GTS NX[15]建立围桩–土拱弦式耦合抗滑结构防护下的列车荷载动力模型，桥墩、桥台和路基结构见图 1。

耦合抗滑结构的围桩桩径 d 为 0.4 m，围桩桩间距 s 为 1.6 m，桩长为 15 m。依据文献[13]中提出的结构布置形式，见图 2。耦合抗滑结构由围桩–土耦合抗滑桩Ⅰ、围桩–土耦合抗滑桩Ⅱ和脚桩组成，拱部形状为合理拱轴线，桩顶用冠梁连接形成一个整体。左半部分桩依次编号 L1#~L8# 桩，右半部分依次编号 R1#~R8# 桩，1# 桩表示 L1# 桩和 R1# 桩，以此类推。考虑到边界效应，建立模型长 83.3 m，宽 100.0 m，高 32.0 m。

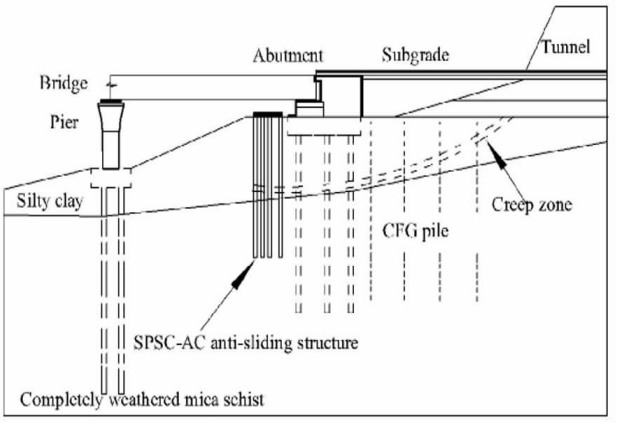


图 1　模型纵断面图
Fig.1　Model of longitudinal profile

1.2　模型材料参数

依据设计资料和室内土工试验结果得到土体参数，其他材料参数参考类似工点[16–17]取得，见表 1 和表 2。用梁单元模拟模型中的围桩，其余均用实体单元模拟。土层材料采用摩尔–库伦强度准则，钢轨、轨道板、CA 砂浆层、支撑层、桥台、桥墩、桩顶冠梁、耦合桩和 CFG 桩采用弹性本构模拟。桩–土接触面设置桩界面单元，剪切刚度模量取值 5 MPa，法向刚度按切向刚度的 10 倍取值[18]，弹性模量按压缩模量的 4 倍取值[19]。

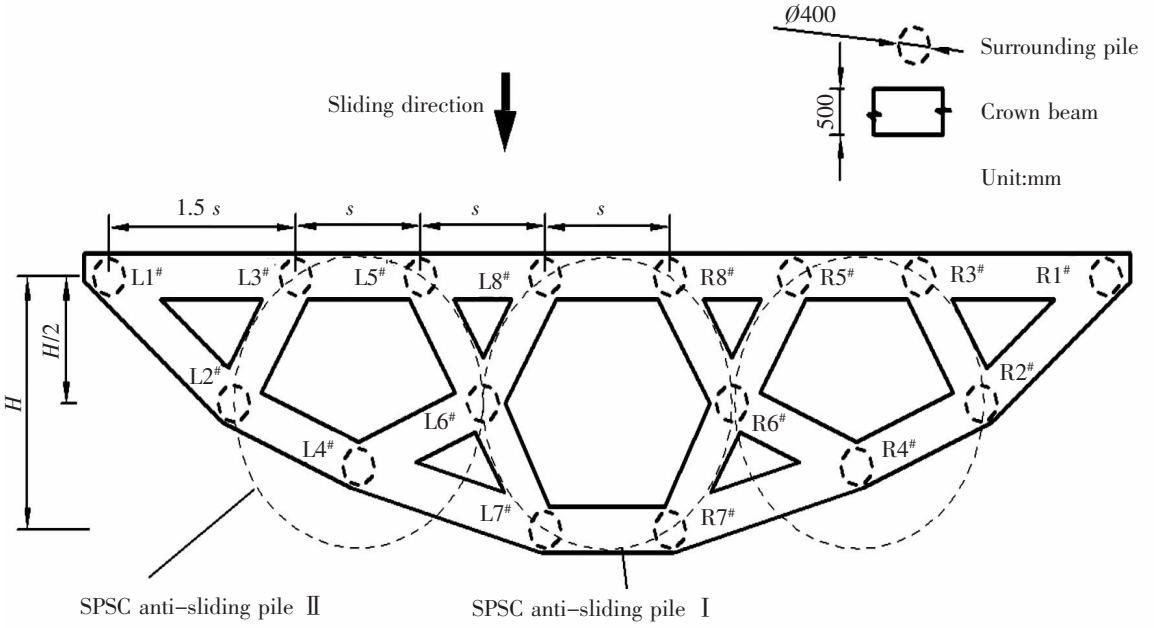


图 2　SPSC–AC 抗滑结构平面布置图
Fig.2　Layout plan of SPSC–AC anti sliding structure

表1 各结构材料参数
Tab.1 Structural material parameters

Name	Density/(g/cm³)	Elastic modulus/MPa	Poisson's ratio	Damping ratio
Rail	7.8	210 000	0.3	
Track plate	2.5	35 000	0.2	0.03
CA mortar layer	1.8	7 000	0.2	0.05
Support layer	2.5	30 000	0.2	0.03
Surface layer of subgrade bed	2.1	210	0.28	0.08
Bottom layer of subgrade bed	1.9	150	0.25	0.07
Embankment	1.9	120	0.32	0.12
Embankment construction	2.4	449	0.21	0.05
Abutment, pier, top beam	2.6	210 000	0.15	0.05
Anti-sliding structure	2.5	210 000	0.30	0.05
CFG pile	1.9	10 000	0.30	0.05
Pier and abutment pile	2.5	200 000	0.30	0.05

表2 土层参数
Tab.2 Soil layer parameters

Soil layer	Density/(g/cm³)	Compression modulus/MPa	Cohesion/kPa	Internal friction angle/(°)
Silty clay	1.86	4.70	29.56	17.53
Creep zone	1.94	2.50	15	14.5
Completely weathered mica schist	1.96	23.6	27.6	25.2

1.3 列车荷载设置

本次模拟采用梁波等[20]研究得出的列车荷载表达式来模拟列车荷载。模拟列车采用国内较普遍的CRH380型动车组,其轴重为150 kN,考虑到列车主要承受乘客和物品的荷载,假定人员及物品的重量平均分布在4个车轴上为20 kN,可得列车轴重为170 kN,即单边静荷载P_0为85 kN,簧下质量m取750 kg。轨道几何不平顺振动按3种条件下波长和相应的矢高取值[21-23]:l_1为10 m,a_1为3.5 mm;l_2为2 m,a_2为0.4 mm;l_3为0.5 m,a_3为0.08 mm。k_1,k_2分别为1.7,0.8。通过计算可得到250,300 km/h和350 km/h速度下列车荷载函数表达式。图3是300 km/h速度下列车荷载前3 s荷载时程曲线。

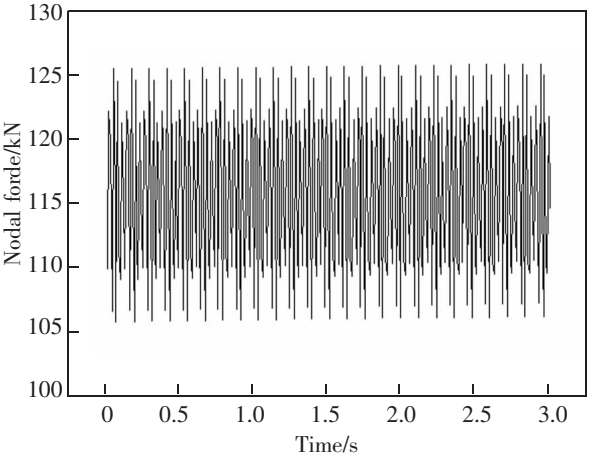


图3 300 km/h列车荷载时程曲线
Fig.3 Load time history curve of 300 km/h

列车荷载采用双线加载，单线加载间距为轨距 1 435 mm，将列车荷载施加在钢轨的节点上。加载时间为 9 s，分 30 个步骤加载。

1.4　约束条件设置

模拟采用软件自带的非线性时程+有限元强度折减法(SRM)对路基-边坡进行稳定性分析，该方法考虑了动载和自重对坡体稳定性的影响，同时结合强度折减法对坡体进行稳定性分析[24]。

根据动力分析的相关理论，非线性时程分析前需进行特征值分析。特征值分析中边界条件采用弹性边界[25]。特征值分析得到的第一阶振型周期 T_1=1.01 s，第二阶振型周期 T_2=1.03 s，用于非线性动力时程分析中计算阻尼矩阵。动力分析模型边界采用人工黏性边界[26]，以便减小边界尺寸对波反射的影响。

有限元强度折减法(SRM)的边界条件采用前后约束 X 方向的位移，左右约束 Y 方向的位移，底部固定。有限元模型见图 4。

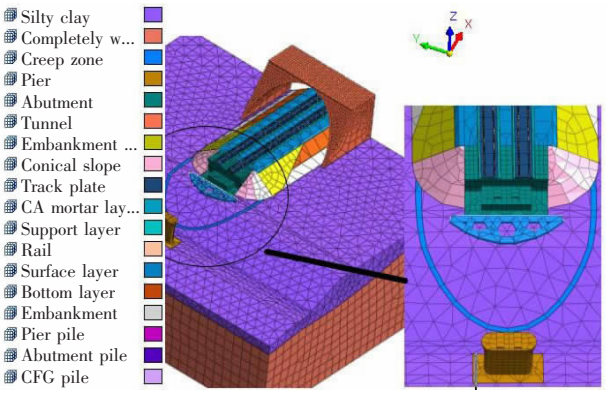


图 4　有限元模型

Fig.4　Finite element model

2　数值模拟结果分析

2.1　路基-边坡变形分析

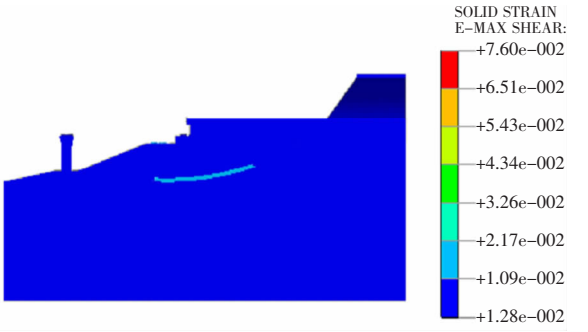
分别模拟列车行驶速度 250,300 km/h和 350 km/h 工况下防护实施前后的情况。限于篇幅选取列车行驶速度 300 km/h 时的防护前后某一时刻进行分析，其余结果类似。

1) 防护前后变形分析。图 5，图 6 是在防护前后下沿轨道中线切面得到的路基-边坡最大剪切应变云图、沿 X 方向和 Z 方向的位移云图。由最大剪切应变云图可以看出，防护前在软弱带处形成了潜在滑带，在防护后潜在滑带在布置 SPSC-AC 抗滑结构处消失，说明 SPSC-AC 抗滑结构有效阻断了蠕滑带的延续。在防护前，边坡安全系数 F_s 为 1.03，由 GB 50330-2013《建筑边坡工程技术规范》可知 $1.00 \leqslant F_s < 1.05$ 属于欠稳定状态；在防护后 F_s 为 1.26，大于 1.15，属于稳定状态。

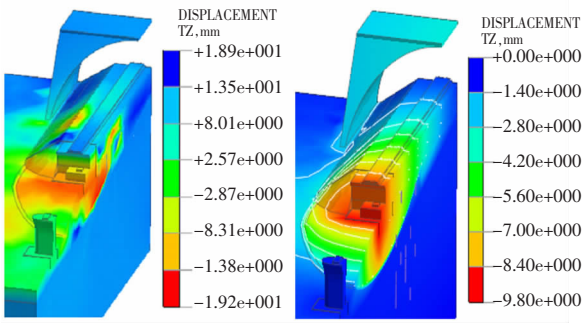
由防护前 X 向的位移云图可知，X 向的位移主要集中在桥台下部及锥坡前，路基与隧道过渡的下部土体也有一定的位移，这与实际发生的变形特征基本吻合，而防护后位移主要集中在抗滑结构后部，防护前最大 X 向位移值为 19.2 mm，防护后最大 X 向位移值为 1.30 mm，位移相比减少了 93%。

由防护前的 Z 向位移云图可知，Z 向位移值在桥台处最大，为 9.8 mm，路基处较小，而防护后桥台处 Z 向位移显著减小，最大位移出现在路基 2.2 mm 处，远小于我国高速铁路规范(TB 10621-2014)限定无砟轨道沉降值 15 mm。

由以上分析表明 SPSC-AC 抗滑结构抗滑效果显著。



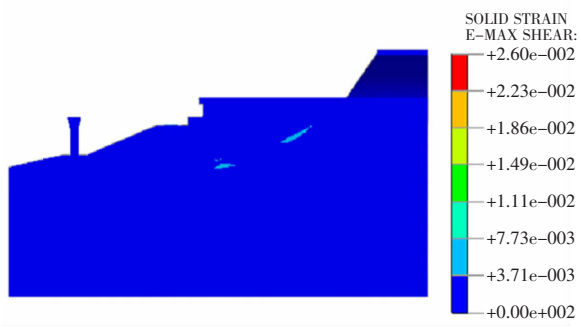
(a) Maximum shear strain



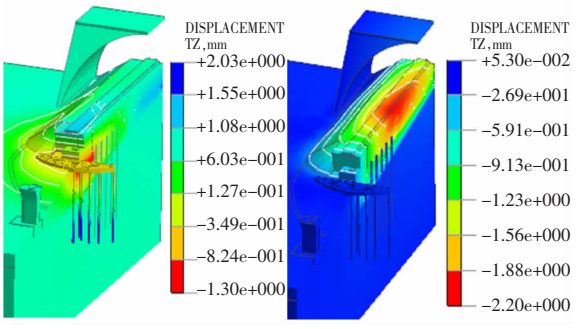
(b) Displacement X　　(c) Displacement Z

图 5　防护前路基-边坡云图

Fig.5　Cloud diagram of subgrade slope before protection



(a) Maximum shear strain



(b) Displacement X (c) Displacement Z

图 6 防护后路基-边坡云图

Fig.6 Cloud diagram of subgrade slope after protection

2) 抗滑结构变形分析。图 7 是 SPSC-AC 抗滑结构与蠕滑带沿 X 方向的位移云图，可以看出，沿 X 向的变形基本上是对称分布，变形区域特征与实际空间变形特征比较符合，蠕滑带以上为受荷段，向滑动方向变形，软弱带以下为嵌固段，变形与滑动方向相反，1#~8# 桩抗滑段长度逐渐增大，嵌固段长度逐渐减小。

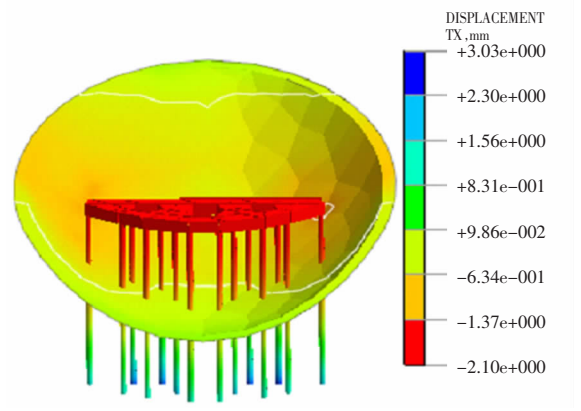


图 7 抗滑结构与蠕滑带位移云图

Fig.7 Displacement nephogram of anti sliding structure and creep zone

图 8 是防护后 SPSC-AC 抗滑结构 1#~8# 桩桩身 X 方向的位移曲线和防护前设桩不同深度处 X 方向的位移特征。可以看出，防护前桩顶向下至蠕滑带处位移值逐渐减小，蠕滑带以下位移值基本为 0，坡面处位移值最大，其中 2# 桩位置处位移值最大 19.69 mm；SPSC-AC 抗滑结构防护后，可以看出位移值显著减小，蠕滑带以上桩身向前弯曲，位移值为负；蠕滑带以下由于桩前土体的抗力，向后弯曲，位移值为正，桩顶处位移值最大为 2.21 mm，与防护前相比减少了89.3%。

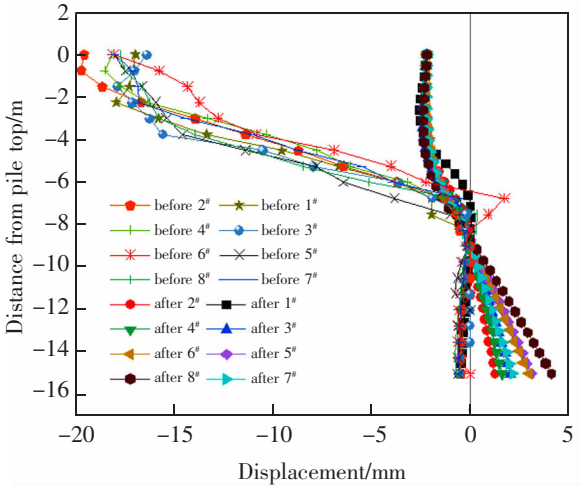


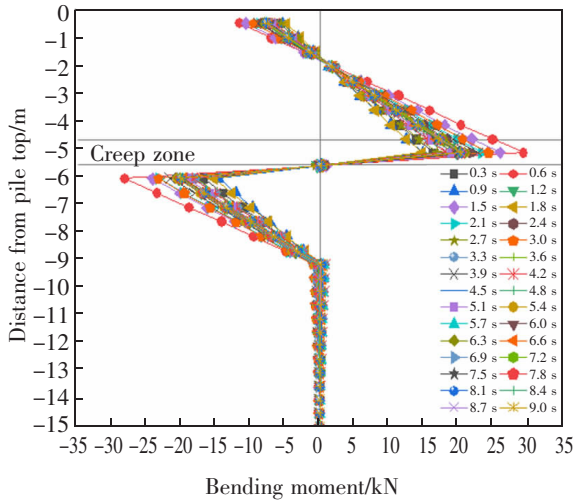
图 8 防护前后不同深度处水平位移值

Fig.8 Horizontal displacement at different depths before and after protection

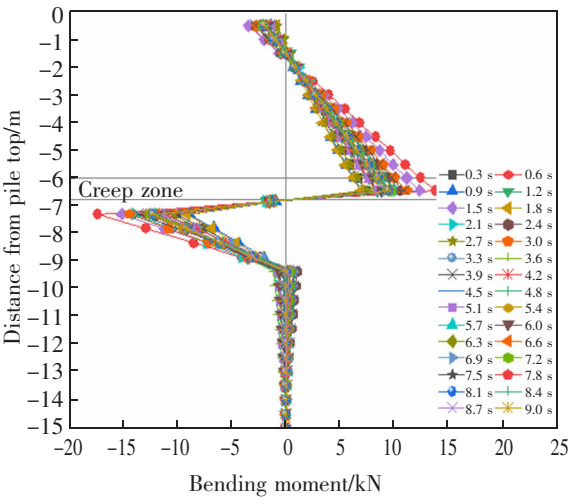
2.2 围桩弯矩值分析

前述分析表明 SPSC-AC 抗滑结构的变形具有对称性，提取围桩桩身弯矩数据，发现左半桩和右半桩的桩身弯矩值大小基本一致，且 1#~8# 桩桩身弯矩分布也基本一样。限于篇幅仅对列车速度 300 km/h 时的右半桩桩身弯矩分布情况进行分析。

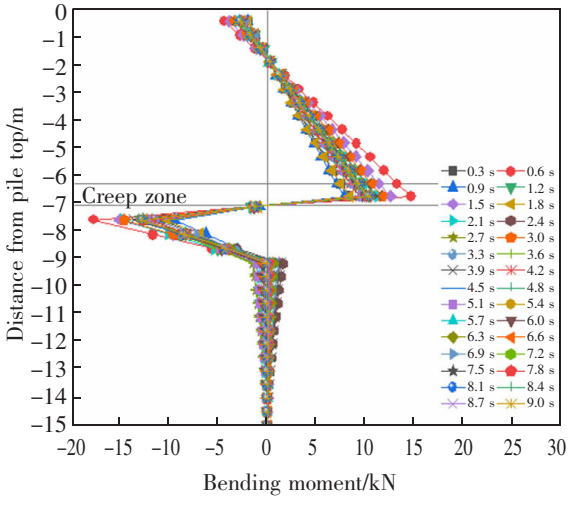
图 9 是各围桩桩身弯矩值随时间变化曲线。由图可以看出各围桩桩身弯矩值的分布大致成 S 形分布，桩顶由于连系梁的存在，都有一定的负弯矩值，其中位于弦部的 1#，3#，5# 桩和 8# 桩桩顶的负弯矩值较其他桩要大，受荷段弯矩值逐渐增大，蠕滑带处弯矩值达到最大，随后反向增大，取得最大负弯矩值，后逐渐减小，趋于 0。可以看到由于设置的是空间椭圆蠕滑带，各围桩与蠕滑带相交的位置不同，但是最大弯矩值都在蠕滑带附近。



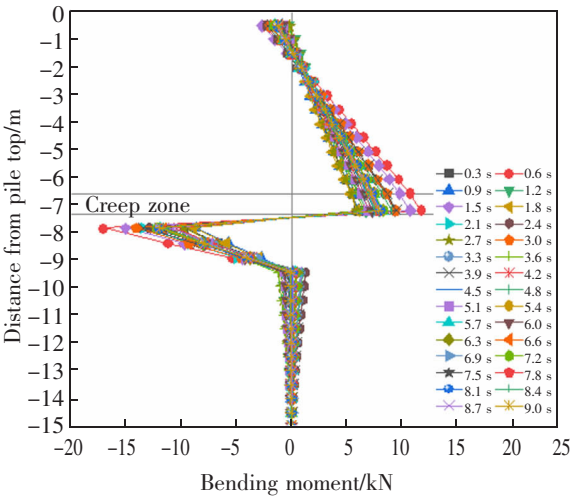
(a) R1# pile



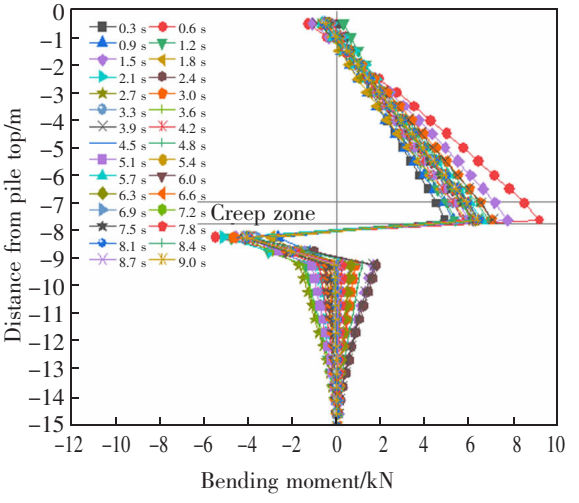
(b) R2# pile



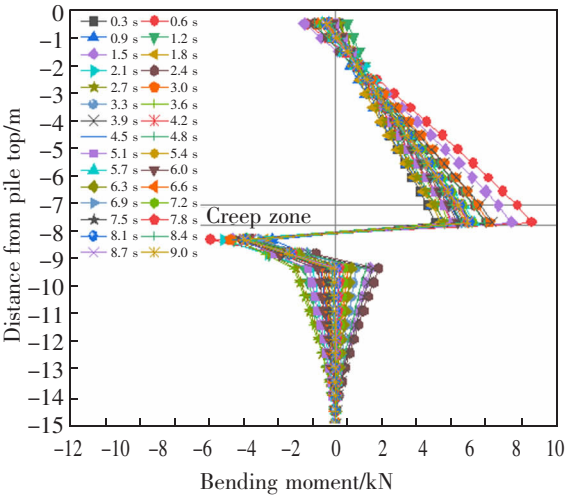
(c) R3# pile



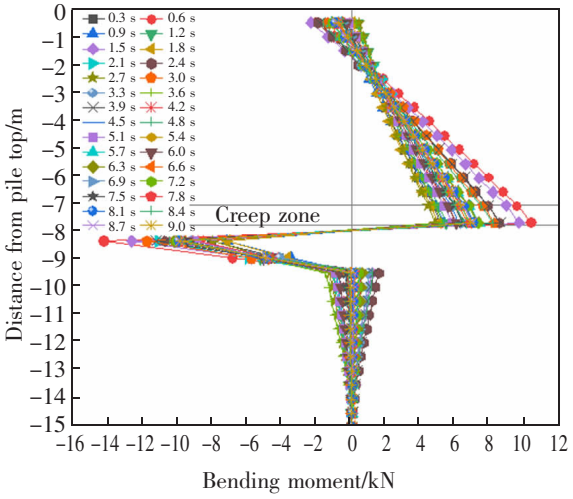
(d) R4# pile



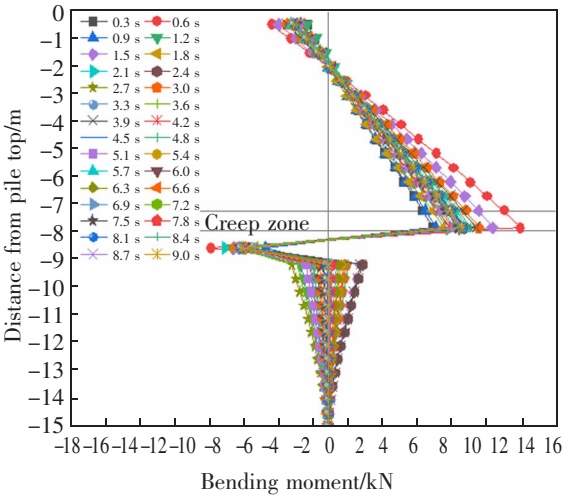
(e) R5# pile



(f) R6# pile



(g) R7# pile

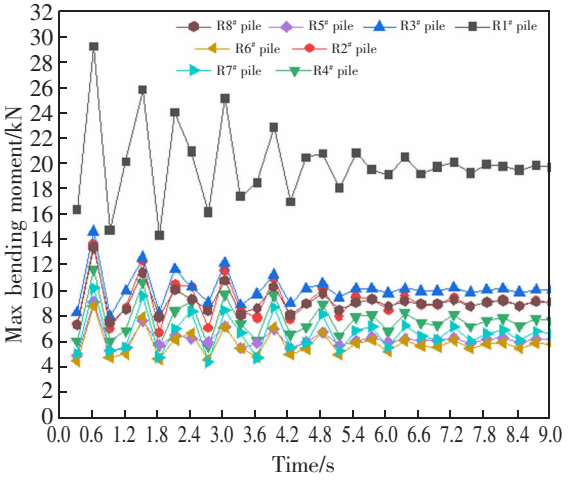


(h) R8# pile

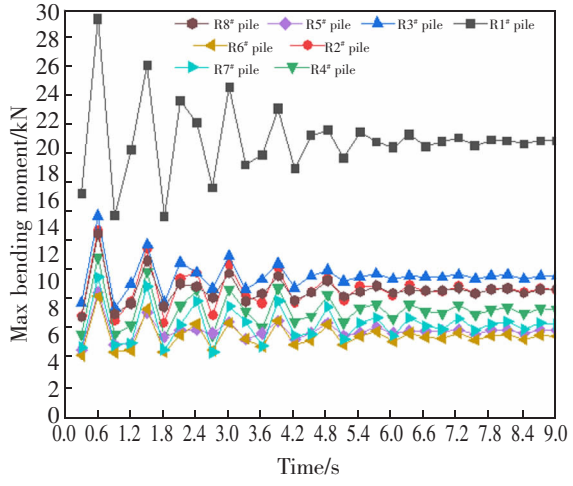
图 9 300 km/h 时各围桩桩身弯矩随时间变化图

Fig.9 Variation of pile shaft bending moment with time at 300 km/h

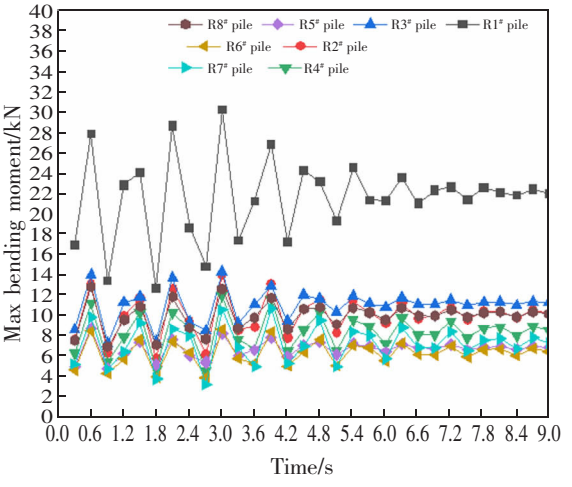
图10 是不同列车行驶速度下各桩桩身最大弯矩值随时间变化图。由时程曲线可知,不同速度下,围桩最大弯矩值随时间的变化基本一致,呈“简谐波”状,随着时间的持续,振幅逐渐减小,7.8~9.0 s 时振幅很小,基本处于稳定状态;各时刻下围桩最大弯矩值排序都表现为 R1# 桩>R3# 桩>R2# 桩>R8# 桩>R4# 桩>R7# 桩>R5# 桩>R6# 桩。R1# 桩的弯矩值要远大于其他桩的弯矩值,其他桩的弯矩值比较集中,分析原因是 1# 桩位于脚部,前部没有桩共同抵抗滑坡推力,而其他桩组成的围桩–土耦合桩Ⅰ和Ⅱ,



(a) 250 km/h



(b) 300 km/h



(c) 350 km/h

图 10 不同速度各桩桩身弯矩最大值随时间变化图

Fig.10 Variation of maximum bending moment of each pile shaft with time at different speeds

根据前人的研究表明[14]，土体被“禁锢”在围桩内，共同抵抗滑坡推力作用，桩-土耦合效应好，而脚部的 1# 桩基本不存在这种效应，导致弯矩值过大，在实际应用中应对两侧的 1# 桩施加预应力锚索和增加配筋率，以提高 1# 桩的抵抗变形的能力，减小弯矩。

表 3 是围桩弯矩分配表，取 7.8~9.0 s 稳定阶段围桩最大弯矩值的平均值作为最终的弯矩值，同时令最终弯矩值最大的 R1# 桩弯矩值为 1，计算得到其他各桩相对于其的比例。由表可知，列车速度为 350 km/h 的 R1# 桩弯矩值最大为 22.16 kN·m，列车速度为 250 km/h 的 R6# 桩弯矩值最小为 5.79 kN·m；不同速度下，围桩稳定阶段的弯矩值大小都有相同的规律：R1# 桩>R3# 桩>R2# 桩>R8# 桩>R4# 桩>R7# 桩>R5# 桩>R6# 桩。进一步分析围桩不同速度下最终的弯矩值可以发现，随着列车行驶速度的增大，围桩最终的弯矩值也随之增大，且围桩的弯矩分配比例都是一致的，R1# 桩为 1.00，R3# 桩为 0.51，R2# 桩为 0.46，R8# 桩为 0.46，R4# 桩为 0.39，R7# 桩为 0.33，R5# 桩为 0.31，R6# 桩为 0.29。

由于结构的对称性，左半桩体结论一致。

表 3　各桩弯矩分配表

Tab.3　Bending moment distribution of each pile

Train speed/(km/h)	Station pile	R1# pile	R2# pile	R3# pile	R4# pile	R5# pile	R6# pile	R7# pile	R8# pile
250	Final bending moment/(kN·m)	19.76	9.13	10.05	7.67	6.15	5.79	6.60	9.09
	Proportion	1.00	0.46	0.51	0.39	0.31	0.29	0.33	0.46
300	Finalbending moment/(kN·m)	20.27	9.37	10.32	7.86	6.32	5.93	6.77	9.33
	Proportion	1.00	0.46	0.51	0.39	0.31	0.29	0.33	0.46
350	Final bending moment/(kN·m)	22.16	10.25	11.27	8.61	6.88	6.49	7.42	10.18
	Proportion	1.00	0.46	0.51	0.39	0.31	0.29	0.33	0.46

3　结论

依托某桥-隧过渡段蠕滑路基，建立围桩-土拱弦式耦合抗滑结构防护三维数值计算模型，采用非线性动力时程+有限元强度折减法，探讨了在列车动荷载作用下，SPSC-AC 抗滑结构各围桩的弯矩分配规律，得出以下结论。

1）围桩弯矩情况：各围桩桩身弯矩值的分布大致成反 S 形分布。一定速度下，各围桩桩身最大弯矩值随时间的变化基本一致，呈“简谐波”状。

2）围桩弯矩分配：随着列车行驶速度的增大，稳定阶段的围桩弯矩值也随之增大。一定速度下的稳定阶段各围桩弯矩值表现为 R1# 桩>R3# 桩>R2# 桩>R8# 桩>R4# 桩>R7# 桩>R5# 桩>R6# 桩。各围桩的弯矩分配比例是 R1# 桩为 1.00，R3# 桩为 0.51，R2# 桩为 0.46，R8# 桩为 0.46，R4# 桩为 0.39，R7# 桩为 0.33，R5# 桩为 0.31，R6# 桩为 0.29。

3）工程意义：SPSC-AC 抗滑结构能够提高边坡的安全系数并减少至少 93%的位移量。同时数值模拟研究发现位于脚部的 1# 桩的桩身弯矩相对较大，为提高 SPSC-AC 抗滑结构整体的稳定性和桩-土耦合效果，工程设计人员可以对脚部的 1# 桩设置预应力锚索和适当提高配筋率。

参考文献：

[1] 向俐蓉，陈伟志，郭在旭，等. 大型滑坡抗滑桩-桩板结构受力变形研究[J]. 水文地质工程地质，2021，48(2)：125-131.
XIANG L R，CHEN W Z，GUO Z X，et al. A study of the deformation of of anti-slide pile and pile-slab structure of large landslide[J]. Hydrogeology and Engineering Geology，2021，48(2)：125-131.

[2] 肖成志，李海谦，高珊，等. 交通荷载下台阶式加筋土挡墙动力响应的试验研究[J]. 岩土工程学报，2021，43(10)：

1789–1797.
XIAO C Z,LI H Q,GAO S,et al. Dynamic response study of tiered geogrids–reinforced soil retaining walls(GRSRW) under traffic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(10):1789–1797.

[3] QIAO S F,XU P,TENG J D,et al. Numerical study of optimal parameters on the high filling embankment landslide reinforced by the portal anti–slide pile[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2020,24(5):1460–1475.

[4] DUAN P,ZHANG C L,LI M Z. Mechanical response of a novel "anti–slide pile+support column" composite retaining structure[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review,2018,11(1):117–125.

[5] WANG Y T,ZHU G Y,DING L B,et al. Numerical simulation of slope failure treatment of a tunnel portal section based on MIDAS GTS[J]. Journal of Physics Conference Series,2021(1):1–7.

[6] ZHANG Y F,LI J,LI W,et al. Effects of landslides on the displacement of a bridge pile group locatedon a high and steep slope[J]. Advances in Civil Engineering,2021(1):1–29.

[7] 蔺鹏臻,武发辉,杨子江,等. 考虑边坡效应的铁路桥台桩基力学行为分析[J]. 中国铁道科学,2014,35(2):32–37.
LIN P Z,WU F H,YANG Z J,et al. Mechanical behavior of railway abutment piles considering slope effect[J]. China Railway Science,2014,35(2):32–37.

[8] 王祥. 微型桩在高速铁路滑坡治理中的设计和应用[J]. 铁道工程学报,2021,38(2):19–22.
WANG X. Design and application of micropiles on treatment for landslide of high speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Science Society,2021,38(2):19–22.

[9] 郑明新,殷宗泽,吴继敏. 滑坡防治工程效果的模糊综合后评价研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(10):1224–1229.
ZHENG M X,YIN Z Z,WU J M. Post–fuzzy comprehensive evaluation of effectiveness of landslide control[J]. Chinese Jouranal of Geotechnical Engineering,2006,28(10):1224–1229.

[10] 郑明新,殷宗泽,吴继敏. 抗滑结构稳定时间的预测方法[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(10):2150–2154.
ZHENG M X,YIN Z Z,WU J M. New prediction method of stability time for anti–slide structures[J]. Chinese Jouranal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(10):2150–2154.

[11] 郑明新,胡国平,钟亮根. 高铁隧道洞口段边坡蠕滑机理分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(7):17–21.
ZHENG M X,HU G P,ZHONG L G. Influence analysis on creeping mechanism for the portal section slope of high–speed railway[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technolagy(Natural Science Edition),2018,46(7):17–21.

[12] ZHENG M X,HU G P. Analysis on the creep mechanism of high–speed railway embankment[C]//The Sixth International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway,2018.

[13] 郑明新. 新型抗滑结构研究现状与发展趋势[J]. 华东交通大学学报,2019,36(5):1–9.
ZHENG M X. Research status and development trend of new anti–slide pile structure[J]. Journal of East China Jiaotong University,2019,36(5):1–9.

[14] 胡国平. 基于典型高铁路基蠕滑特性的新型耦合抗滑结构研究[D]. 南昌:华东交通大学,2019.
HU G P. Study on new coupled anti–sliding structure based on creep characteristics of high–speed railway subgrade[D]. Nanchang:East China Jiaotong University,2019.

[15] 李治. Midas/GTS 在岩土工程中应用[J]. 岩土力学,2013,34(8):2413–2413.
LI Z. Application of Midas/GTS in geotechnical engineering[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(8):2413–2413.

[16] 邓国栋,张家生,王启云,等. 高速铁路粗粒土填料动力参数试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2014,11(2):76–83.
DENG G D,ZHANG J S,WANG Q Y,et al. Experimental research on dynamic parameters of high–speed railway coarse–grained padding[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2014,11(2):76–83.

[17] 张智. 客运专线铁路路基变形模量检测与路基压实质量评价分析[J]. 铁道建筑,2010(7):84–86.
ZHANG Z. Deformation modulus detection and subgrade compaction quality evaluation of passenger dedicated railway subgrade[J]. Railway Engineering,2010(7):84–86.

[18] 杨尧. 客运专线铁路基床填料动静三轴试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
YANG Y. Experimental study on typical filler for passenger dedicated railway subgrade roadbed by static and dynamic triaxial test[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2009.

[19] 余海堂. 转体施工连续刚构桥主墩群桩基础受力分析[J]. 中外公路,2016,36(3):130–134.
YU H T. Stress analysis of pile group foundation of main pier of swivel construction continuous rigid frame bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway,2016,36(3):

130-134.

[20] 朱云祥，陈哲，方瑜，等. 灌注桩竖向承载力静载试验与有限元模拟[J]. 结构工程师，2021，37(4)：152-159.
ZHU Y X，CHEN Z，FANG Y，et al. Static load test and finite element simulation of vertical bearing capacity of bored piles[J].Structural Engineers，2021，37(4)：152-159.

[21] 梁波，罗红，孙常新. 高速铁路振动荷载的模拟研究[J]. 铁道学报，2006，28(4)：89-94.
LIANG B，LUO H，SUN C X. Simulated study on vibration load of high speed railway[J]. Journal of the China Railway Society，2006，28(4)：89-94.

[22] JENKINS H H，STEPHENSON J E，CLAYTON G A，et al. The effect of track and vehicle parameters on wheel /rail vertical dynamic loads[J]. Railway Engineering Journal，1974，3(1)：2-16.

[23] DAWN T M，STANWORTH C G. Ground vibrations from passing trains[J]. Journal of Sound & Vibration，1979，66(3)：355-362.

[24] 高广运，谢伟，陈娟，等. 高铁运行引起的高架桥群桩基础地面振动衰减分析[J]. 岩土力学，2019，40(8)：3197-3206.
GAO G Y，XIE W，CHEN J，et al. Ground vibration attenuation of viaduct and pile-group foundation induced by moving high-speed train[J]. Rock and Soil Mechanics，2019，40(8)：3197-3206.

[25] 叶志程，杨溢，左晓欢，等. 基于 Midas-GTS/NX 的不同工况下某边坡稳定性分析及加固措施[J]. 化工矿物与加工，2021，50(5)：16-19.
YE Z C，YANG Y，ZUO X H，et al. Stability analysis of a slope with reinforcement based on Midas-GTS/NX under different working conditions[J]. Industrial Minerals & Processing，2021，50(5)：16-19.

[26] 路言杰，闫孔明，吴金标，等. 高速列车运行对软土区桩-网复合地基的动力影响范围[J]. 铁道建筑，2015(11)：61-64.
LU Y J，YAN K M，WU J B，et al. Dynamic influence range of high-speed train operation on pile net composite foundation in soft soil area[J]. Railway Architecture，2015(11)：61-64.



第一作者：郑明新(1966—)，男，教授，博士，博士生导师，主要研究方向为边坡稳定与道路工程病害整治。E-mail: 492001473@qq.com。



通信作者：任勇江(1997—)，男，硕士研究生，研究方向为新型防护结构研究。E-mail: 1020325835@qq.com。

(责任编辑：刘棉玲)