

文章编号: 1674-599X(2020)02-0016-06

地铁隧道施工钢板超前支护应用分析

熊胜¹, 邵帅², 周浩¹, 凌涛¹

(1. 中铁五局集团有限公司, 湖南 长沙 410000; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 针对在富水软弱地层中采用浅埋暗挖法修筑隧道过程中易发生变形过大、失稳等问题, 以长沙地铁5号线工程为依托, 在隧道断面外轮廓线布置正、反向邻接的拉森钢板进行水平方向的超前支护试验研究, 并通过ABAQUS有限元软件对钢板加固段支护效果进行模拟分析。研究表明: 该方法有效地提高了隧道初期支护结构的抗变形能力, 增强了隧道开挖时掌子面的稳定性, 从而有效减少了地表和管线的沉降变形, 具有良好的超前支护效果。

关键词: 隧道工程; 富水软弱地层; 拉森钢板; 超前支护

中图分类号: U455 文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.003

Analysis of the steel plate advance support in subway tunneling construction

XIONG Sheng¹, SHAO Shuai², ZHOU Hao¹, LING Tao¹

(1. China Railway No.5 Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410000, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to solve the problems such as excessive deformation and instability in the process of shallow tunnel construction in water-rich and weak strata using subsurface excavation method, based on the project of Changsha metro line 5, horizontal advance support test was carry out, the Larson steel plate with positive and reverse adjacent lines was arranged in the outer profile of the tunnel section. The support effect of steel plate reinforced section was simulated using ABAQUS finite element software. The results show that the anti-deformation ability of the initial support structure of the tunnel can be effectively improved, the stability of the tunnel surface during excavation is also enhanced. Consequently, the subsidence deformation of the surface and the pipeline will be reduced significantly. The effective pre-support can be achieved using this method.

Key words: tunnel engineering; water-rich and soft stratum; Larsen steel plate; pre-support technology

软岩大变形是影响隧道施工的常见问题。通常采用超前小导管、帷幕注浆等方式对掌子面前方软弱围岩进行加固^[1]。由于超前小导管存在加固范围小、注浆难以形成连续密闭的支护体系, 隧道中松软、富水和无自稳能力的软弱地层的适应性较差。帷幕注浆成本高, 对地层扰动较大, 且部分管廊、管线结构段不具备施工条件。因此, 如何有效减小富水地层软岩的大变形, 保障连续、快速施工成为

隧道施工控制的重要课题。国内、外许多学者围绕掌子面稳定和加固方式进行了研究。陈峥^[2]等人通过极限分析上限法验证了超前支护增强隧道掌子面稳定性的作用。罗爱忠^[3]等人采用有限差分数值法, 分析了黄土隧道穿越软弱地质带可能的破坏形式, 提出了相应的超前支护方式。在支护结构方面, 李术才^[4]等人根据框架-核心筒组合承载思路, 研究开发了格栅核心筒支护结构, 并在工程上取得试验

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51804113)

作者简介: 熊胜(1982-), 男, 中铁五局集团有限公司高级工程师。

应用。韩素文^[5]以宝峰隧道为背景, 研究了软岩隧道的超前支护方法, 提出了一种超前注浆预衬砌支护的新方法, 取得了良好的效果。陈尚荣^[6]等人基于有限元数值模拟, 考虑土体和基坑围护结构与矩形地下通道之间的相互作用, 建立了深基坑开挖过程和矩形地下通道弹塑性数值仿真模型, 用于评价不同的施工方案对邻近矩形地下通道变形的影响。孙文君^[7]等人以浅埋公路隧道为工程背景, 对比不同掘进方向下的隧道开挖反应特征, 分析了土石界面倾角对隧道开挖反应的影响。张光武^[8]在筒仓理论的基础上, 建立了隧道掌子面破坏模型, 提出了考虑在地下水渗透力和断层影响下掌子面稳定的解析方法, 并通过对比分析认为: 中国传统的支护理论普遍偏于保守, 且取值范围较大。潘峰^[9]等人基于相关联流动法则, 确立了挡土墙后竖向分层填土的静力平衡关系, 建立了竖向分层主动土压力关于滑动面夹角的数学模型。傅家俊^[10]等人依托长沙国际金融中心深基坑支护工程, 提出了进化新陈代谢方法的优化灰色离散 Verhulst 模型, 其精度更高, 可选用该模型对基坑进行沉降预测。

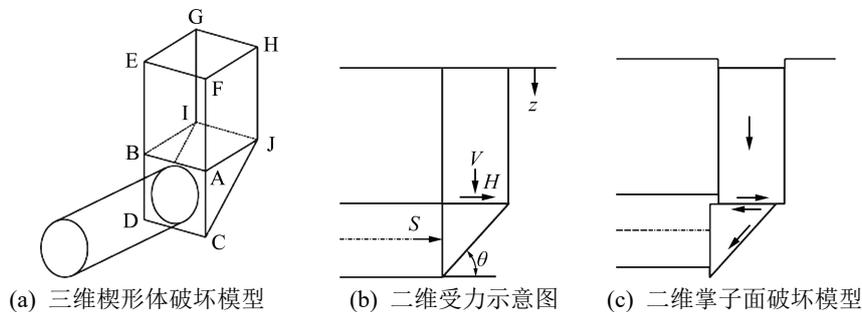


图 1 隧道掌子面模型

Fig. 1 Analysis model of the tunnel face

土体变形, 钻孔后若跟管不及时会引起孔口变形、塌孔, 发生地面下沉。且超前支护和注浆无法完全固结隧道轮廓外区域形成临时“外壳”, 砂土层尤其是细砂土易坍塌和流失, 形成空洞, 成为影响地面下沉的重要因素。

3) 由于部分既有管廊、管线特殊线型控制要求 ($\leq 15 \text{ mm}$), 为避免注浆固结管线和注浆压力对管线结构的损坏, 不宜采用注浆加固, 限制了传统超前支护措施的使用, 并给隧道超前支护、开挖支护提出了更高的要求。

在图 1(a)中, 在 BAJI 面通过插入具有竖向承载力的钢板支护可有效减少上部土体对楔形块体

本研究针对富水、浅埋及软弱的地层隧道施工, 拟采用常规尺寸的拉森钢板, 设计一种对隧道拱部形成连续、刚性及密闭的超前支护, 对隧道掌子面前方围岩起到有效的支撑作用, 并通过 ABAQUS 有限元软件对钢板加固段支护效果进行模拟分析, 以期类似地铁隧道施工和研究提供借鉴。

1 钢板超前支护技术

1.1 传统超前支护施工存在的问题

传统超前支护措施在山岭隧道施工中具有较好的效果, 但在浅埋、软弱和砂土富水地层施工中, 具有局限性和风险性:

1) 根据 Horn^[11]提出的均匀软质地层隧道开挖面稳定性的计算模型, 如图 1 所示。软岩隧道掌子面的破坏主要由掌子面前部上方棱柱体下沉挤压下部楔形土体, 沿隧道纵向发生剪切破坏, 且该工况应是在无流水通道的情况下适用。

2) 超前管棚(或导管)钻孔及注浆期间易产生

的竖向压力, 且采用连续封闭支护对防止砂土渗漏和坍塌及防水起到良好的效果, 提高了岩土体的有效应力, 避免下部土体发生剪切破坏。

1.2 钢板超前支护

钢板超前支护可以为隧道的淤泥地层、黏土层、砂卵石层及砂土层等浅埋软弱地质段提供有效、可靠的超前支护。通过多块拉森钢板的组合对隧道拱部无自稳能力的软弱地层形成支撑作用, 分担上部围岩荷载, 且具有良好的止水效果, 保证了开挖的安全性, 降低了现场施工风险。通过采用薄钢板, 缩短钢板长度, 并将钢板扣接处焊接, 对施工中富水细砂地层的隧道拱腰至拱脚区常遇流砂

的情况,可以增加止水效果,提高结构整体性。

采用该支护体系可以实现:①在富水砂土地层,可迅速形成连续的封闭环,有效防止砂土及泥水的塌落和流失。②有效控制沉降变形量,保障既有管廊和管线等构造安全。③在特殊管线地段采用非超前注浆法施工,可提高施工的操作性和可靠性。其主要施工参数为:腹板厚 10~15 mm 拉森钢板(主要依据土体受力情况确定),宽幅为 0.40~0.60 m,长度为 4~6 m,钢板打入端头制作成楔形,每循环纵向搭接长度为 1 m,超前支护范围根据地质情况确定。

1.3 超前钢板支护试验步骤

采用超前钢板沿初支外缘纵向打设,钢板间沿隧道轮廓线横向扣接,形成封闭、连续的超前钢环,代替超前导管,实现“由点到面”整体超前。开挖后超前钢环与钢架楔紧,整体受力。具体试验步骤为:①在隧道开挖断面轮廓外进行测量放线,确定拉森钢板打入位置,一般沿开挖断面轮廓外 0.2 m 处布设。②为方便打入,将拉森钢板端头加工为楔形,使用打桩机或挖机沿放线位置布置正向拉森钢板,拉森钢板打入地层,外露 0.5 m。③打设反向拉森钢板,与正向钢板紧扣连接。④重复步骤②和③,完成支护范围内超前钢板。⑤在拉森钢板内缘安装钢拱架与其紧密连接,楔块紧贴,起到支点稳定作用。⑥超前支护完成后,按设计循环进尺掘进。在试验中,应控制拉森钢板的打入角度和钢板扣接的质量控制,第一块钢板打设前,应设置导线标,反向钢板打设应随时调整和控制横向轮廓位置。

2 工程试验

2.1 工程概况

长沙市轨道交通 5 号线一期工程毛竹塘站为南端起始站。上层滞水水位埋藏深度 0.50~3.50 m,试验区段地质及主要管线情况,如图 2 所示,依据《城市轨道交通工程监测技术规范(GB 50911—2013)》^[12]及产权单位对变形控制要求,毛竹塘站隧道下穿 4 处主要管线布设和变形控制要求见表 1。

2.2 现场超前支护方案

为对超前钢板的支护效果进行检验,选取下穿 D1500 雨水管的 D03 +008~+024 段,采用 FSP-II 型拉森钢板进行支护试验对比,拉森钢板的腹板厚

度为 10.5 mm,有效宽度为 0.40 m,有效高度 0.10 m,长度为 4.50 m。在隧道拱部按 3° 外插角,沿环向 180° 布置。

表 1 既有管线布设及变形要求

Table 1 Requirement of existing pipeline layout and deformation

管线类型 和直径	埋深/ m	与隧道顶部 距离/m	与隧道轴线 斜交角度/(°)	变形控制/ mm
给水管 D400	1.55	2.67	82	≤15
雨水管 D1500	2.19	0.83	85	≤15
国防光缆 Φ40 管	3.27	1.20	85	≤20, 周围不得固结
弱电管排 10 束	3.17	1.25	82~86	≤30, 周围不得固结

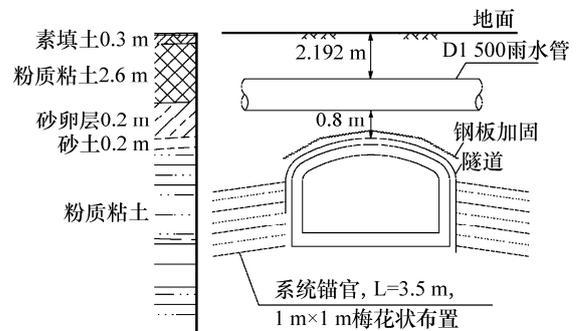


图 2 试验区段地质和管线布设

Fig. 2 Geological condition of experimental section

实施过程中主要对地表、周边管线及洞内进行了监测,及时获取地表沉降和周边管线变形等信息。

1) 地表沉降

按纵向每 5 m 布置一个测点(如图 3 中 DB1~DB5)。一般区域钻孔至原状土,底端设混凝土固结螺纹钢标志,孔深不小于 0.5 m,孔间回填细砂,孔顶部设 0.15 m 直径不锈钢保护井,井口低地面 5 mm。管线及管道处增设监测断面,雨水管处监测点孔底至结构混凝土的表面,其余布设相同,以确保监测准确率,施工期间严格按设计及规范要求的频率、频次进行监测。

2) 周边管线监测

管线变形监测点按管道走向的纵向 5 m 间距布置,对周边管线的监测一般在检查井处进行。先在检查井处选定好监测点(或每隔 15 m 挖探沟至管道表面做抱箍测点),并作相应标记与记录,用精密水准仪测定初始值,监测方法与地表沉降监测一致。钢板支护隧道试验段每隔 5 m 在隧道轴线对应地表设

置 1 个测点, 共设置 5 个。在 D1500 排水管以隧道轴线为对称轴, 每 5 m 一个测点对称布置 5 个测点 (如图 3 中 SG1~SG5)。

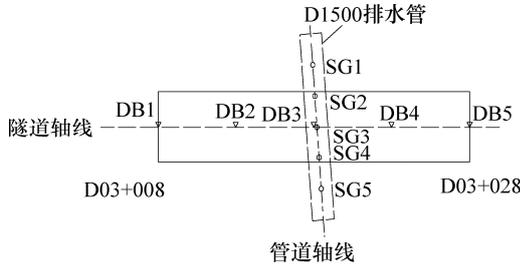


图 3 测点布置平面布置示意

Fig. 3 Layout plan of measuring points

3) 洞内监测

按设计及规范要求对拱顶下沉和水平收敛监测, 测点布置和测设要求同山岭隧道, 测点布置如图 4 所示。

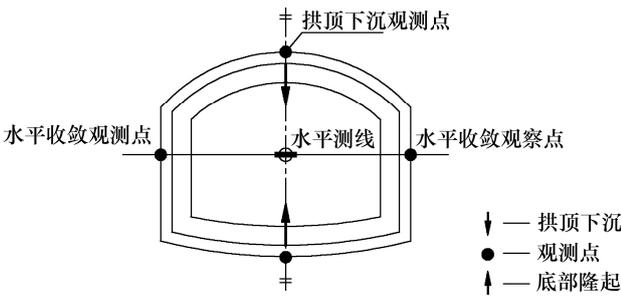


图 4 洞内测点布置示意

Fig. 4 Schematic layout of measuring points in the tunnel

2.3 试验结果分析

采用 ABAQUS 有限元软件对该钢板加固段进行模拟, 分析在该工程区段地质条件下不同超前支护方式对隧道和管道沉降变形的影响。分别对采用钢板超前支护和超前小导管支护的隧道和上覆管道的沉降变形进行对比分析。隧道衬砌采用实体单元模拟如图 5 所示。钢板加固采用壳单元模拟。首先隧道开挖上方根据现场情况设置 D1500 雨水管一根; 然后平衡初始地应力, 激活雨水管道并清零位移; 最后对每一步循环开挖土体按施工进尺进行“钝化”操作, 并激活上一循环隧道衬砌单元, 依次进行, 直至该段隧道开挖完成。

ABAQUS 有限元模拟结果如图 5,6 所示。从图 5,6 可以看出, 采用钢板超前支护时, 管道最大下沉量为 11.88 mm, 相比于超前小导管支护的管道最大下沉量(18.57 mm)减小 6.69 mm, 且满足沉降不超过 15 mm 的规范要求。隧道拱顶沉降由 17.83 mm

减小为 8.52 mm, 表明: 钢板超前支护能有效减小隧道上覆管道的沉降。同时, 钢板超前支护与初期支护结合抗变形能力较超前小导管明显增强。

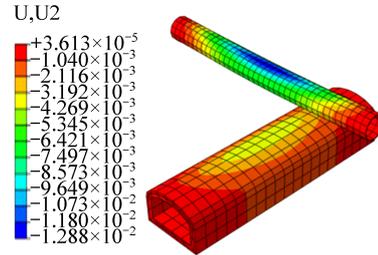


图 5 钢板超前支护结果

Fig. 5 Results of steel plate advance support

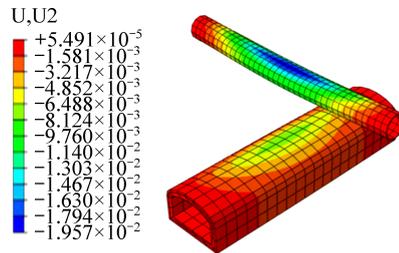


图 6 超前小导管支护结果

Fig. 6 Results of advance small pipe

如图 7 所示, 将管道沉降对应测点的模拟值与实测值进行对比分析, 模拟值与实测值基本一致, 实测值略大, 两者最大值均小于规范标准 15 mm。由于 D1500 排水管与隧道只相交一次, 无法对同一管道沉降值进行纵向对比。但根据现场实际工程情况, 采用超前小导管支护段与其他管线相交时, 管线沉降值均大于 20 mm。因此, 钢板支护对施工段管线沉降能起到良好的控制作用。

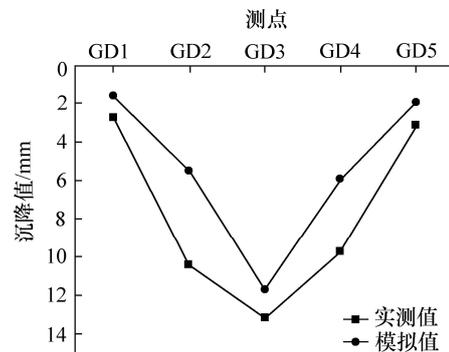


图 7 管道测点的沉降值

Fig. 7 Pipe settlement value

现场选取相邻无管线交叉, 采用超前小导管支护段的地表沉降值作为对比, 模拟得到对应测点的沉降值与实测值见表 2。从表 2 中可以看出, 施作钢板加固段地表测点沉降均值为 14.0 mm, 由于钢

板构件不标准、打设不熟练而影响支护及时性等原因,稍大于数值模拟计算值 11.2 mm,但显著优于超前小导管支护段沉降均值 23.9 mm。因此,对隧道施作钢板支护,可有效减小开挖过程中的地表沉降值,提高支护的稳定性与安全性。

表2 拱顶处地表沉降值

Table 2 Ground settlement at the position of the vault

点号	钢板支护段 现场沉降值/mm	超前小导管现场 沉降值/mm	钢板支护数值 模拟值/mm
DB1	14.7	24.6	9.4
DB2	11.9	27.1	10.6
DB3	14.6	23.7	13.2
DB4	13.3	22.4	11.7
DB5	15.6	21.5	11.3
平均值	14.0	23.9	11.2

车站出入口暗挖隧道通过使用钢板超前支护法,施工期间未出现漏砂、坍塌及大变形,对地表、周边管线及洞内进行了监测,实测值与模拟值相符,满足了设计及规范要求。表明:钢板超前支护变形控制效果明显优于传统超前支护。

3 结论

1) 钢板超前支护连续性好。相比于目前现有的注浆超前支护方式,钢板超前支护可对隧道掌子面前方围岩形成连续、封闭环支护,有效控制隧顶管道及地表沉降,提高隧道稳定性,避免塌方和漏砂现象。

2) 采用钢板超前支护变形控制效果明显优于传统超前支护。对于下穿有压管线和刚性管道地段的超前支护措施提供了可行性方案,并避免了传统注浆措施引起的管线固结情况。

3) 具有良好的防水效果。由于拉森钢板的凹槽结构,钢板超前支护在提高地层承载力的同时,还可形成“雨棚”效应,对掌子面起到有效的引水及防水作用,减少水对土体的破坏。

4) 该方法后续可优化钢板构造,改进外形结构,构造外缘可设置注浆孔口增强适应性。施工中需设置钢板固定和打设辅助装置提高施工效率。

参考文献(References):

[1] 张广泽,柴春阳,宋章,等.软岩大变形发生的边界条件及对策探讨[J].铁道工程学报,2018,35(8):27-31.(ZHANG Guang-ze,CHAI Chun-yang,SONG Zhang,et al.The

discussion of boundary condition for large deformation of soft rockmass and its control countermeasures[J].Journal of Railway Engineering Society,2018,35(8):27-31.(in Chinese))

- [2] 陈峥,何平,颜杜民,等.超前支护下隧道掌子面稳定性极限上限分析[J].岩土力学,2019,40(6):2154-2162.(CHEN Zheng,HE Ping,YAN Du-min,et al.Upper-bound limit analysis of tunnel face stability under advanced support[J].Rock and Soil Mechanics,2019,40(6):2154-2162.(in Chinese))
- [3] 罗爱忠,邵生俊,陈昌录,等.黄土隧道穿越软弱地质带失稳破坏和超前支护效果分析[J].公路交通科技,2014,31(3):101-105.(LUO Ai-zhong,SHAO Sheng-jun,CHEN Chang-lu,et al.Analysis of unstable failure and effect of advanced support for construction of loess tunnel in weak geological zone[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2014,31(3):101-105.(in Chinese))
- [4] 李术才,徐飞,李利平,等.隧道工程大变形研究现状、问题与对策及新型支护体系应用介绍[J].岩石力学与工程学报,2016,35(7):1366-1376.(LI Shu-cai,XU Fei,LI Li-ping,et al.State of the art:challenge and methods on large deformation in tunnel engineering and introduction of a new type supporting system[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(7):1366-1376.(in Chinese))
- [5] 韩素文.软岩隧道超前注浆预衬砌支护新方法与应用[J].施工技术,2017,46(1):102-105.(HAN Su-wen.New method and its application of advanced grouting lining support of soft rock tunnel[J].Construction Technology,2017,46(1):102-105.(in Chinese))
- [6] 陈尚荣,曹传祥,廖志坚.不同支护深基坑开挖对地下通道变形的影响[J].交通科学与工程,2018,34(4):43-52.(CHEN Shang-rong,CAO Chuan-xiang,LIAO Zhi-jian.The influence of deep excavation on the deformation of surrounding rectangular underground tunnel based on different supporting forms[J].Journal of Transport Science and Engineering,2018,34(4):43-52.(in Chinese))
- [7] 孙文君,薛少强,肖成志,等.土石交界地质条件下浅埋隧道的开挖反应研究[J].公路工程,2019,44(4):169-173.(SUN Wen-jun,XUE Shao-qiang,XIAO Cheng-zhi,et al.Study on excavation reaction of shallow tunnel under the boundary condition of soil and rock[J].Highway Engineering,2019,44(4):169-173.(in Chinese))
- [8] 张光武.基于筒仓理论的近接断层掌子面稳定分析模型[J].地下空间与工程学报,2016,12(S2):663-668.

- (ZHANG Guang-wu.Stability analysis model of tunnel face closed to fault based on silo theory[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2016,12(S2):663-668.(in Chinese))
- [9] 潘峰,陈文胜,丁博,等.竖向分层土主动土压力的分析与计算[J].交通科学与工程,2019,35(2):1-5,50.(PAN Feng, CHEN Wen-sheng,DING Bo,et al.Analysis and calculation of the active earth pressure of the vertical stratified soil[J].Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(2):1-5,50.(in Chinese))
- [10] 傅家俊,尹泉,傅鹤林,等.基于优化的灰色离散 Verhulst 新陈代谢模型的基坑沉降预测[J].公路工程,2019,44(2):19-22,120.(FU Jia-jun,YIN Quan,FU Helin,et al. Settlement prediction of foundation pit based on optimized grey discrete verhulst metabolic model[J]. Highway Engineering,2019,44(2):19-22,120.(in Chinese))
- [11] Horn M.Horizontal earth pressure on perpendicular tunnel face[C]//Proceedings of the Hungarian National Conference of the Foundation Engineer Industry. Budapest,Hungary:Hungary Press,1961:7-16.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50911—2013,城市轨道交通工程监测技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.GB 50911—2013,Code of monitoring measurement of urban rail transit engineering[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2013.(in Chinese))

(上接第84页)

- [9] 陈斌.基于 WIM 的疲劳荷载模型和钢桥疲劳性能评估方法研究[D].杭州:浙江大学,2018.(CHEN Bin.Research on fatigue load model based on WIM and fatigue performance evaluation method of steel bridge[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2018.(in Chinese))
- [10] 中国汽车技术研究中心.中国汽车车型手册[M].山东:山东科学技术出版社,1993.(China Automotive Technology and Research Center.China automotive model manuals[M].Ji'nan:Shandong Science and Technology Press,1993.(in Chinese))
- [11] 杨伟斌,吴光强,秦大同,等.汽车性能数据库的建模[J].重庆大学学报:自然科学版,2006,29(1):8-11.(YANG Wei-bin,WU Guang-qiang,QIN Da-tong,et al.Modeling of automobile performance database[J].Journal of Chongqing University:Natural Science Edition,2006,29(1):8-11.(in Chinese))
- [12] 段雪岩.高原山区高速公路桥梁疲劳荷载谱[D].昆明:昆明理工大学,2017.(DUAN Xue-yan.Fatigue load spectrum of highway bridges in plateau and mountain areas[D].Kunming:Kunming University of Science and Technology,2017.(in Chinese))
- [13] 云南省公路交通情况调查(2016 年分析资料汇编)[M].云南省公路局,2017.(Survey of highway traffic in Yunnan province (compilation of analysis data in 2016) [M].Yunnan Provincial Highway Bureau,2017.(in Chinese))
- [14] 中国第一汽车集团公司.GB1589-2016,汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值[S].北京:中国标准出版社,2016.(China First Automobile Works Group. GB1589-2016, Car, trailer and car train dimensions, axle loads and mass limits[S].Beijing:China Standards Press, 2016.(in Chinese))
- [15] 苏建明,周广利,王娜,等.济青高速公路桥梁疲劳荷载车辆模型研究[J].公路交通科技:应用技术版,2018(5).(SU Jian-ming,ZHOU Guang-li,WANG Na,et al.Research on fatigue load vehicle model of Jiqing expressway bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development:Application Technology Edition,2018(5). (in Chinese))
- [16] 杨泽刚.典型高速公路实际运行车辆荷载模型研究[D].南京:东南大学,2015.(YANG Ze-gang.Study on the load model of a typical highway actual running vehicle[D]. Nanjing:Southeast University,2015.(in Chinese))
- [17] 宋秀华,肖新辉,鲁乃唯.基于疲劳损伤的中小跨径桥梁限载取值研究[J].交通科学与工程,2019,35(2):58-63.(SONG Xiu-hua,XIAO Xin-hui,LU Nai-wei.Study on load limiting value of medium and small span bridges based on fatigue damage[J].Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(2):58-63.(in Chinese))