

软硬不均地层沉管隧道碎石基床力学特性研究

张涛¹, 李云刚¹, 胡传鹏¹, 付佰勇²

(1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088;
2. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 北京 100120)

摘要: 为揭示软硬不均地层下沉管隧道碎石基床力学特性, 通过有限元分析及理论计算, 对沉管隧道纵横向地基沉降及刚度的分布规律、参数敏感性、结构纵向受力响应问题进行量化分析, 结果表明: 岩基段基底压力分布中间小两侧大, 中间位置会出现脱空, 软基段为两端小中间大, 结构两端会出现脱空; 岩基与软基的基底应力值较为接近, 但地基刚度相差较大, 岩基段为软基段的14倍; 岩基段地基纵向刚度受垫层厚度、模量及预压荷载等参数影响变化大, 应以岩基段垫层设计厚度作为全线的控制标准; 软基段接头平均剪力约为岩基段的3倍; 软硬不均地层沉管隧道碎石基床力学特性研究为沉管法隧道在复杂地质条件下推广应用提供了重要参考意义。

关键词: 沉管隧道; 软硬不均地层; 碎石基床

中图分类号: U655.544 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2024)04-0044-05
doi:10.7640/zggwjs202404010

Mechanical characteristics of gravel bed for immersed tube tunnels in heterogeneous ground

ZHANG Tao¹, LI Yun-gang¹, HU Chuan-peng¹, FU Bai-yong²

(1. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China;
2. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: In order to reveal the mechanical characteristics of gravel bed of immersed tube tunnel in heterogeneous ground, a quantitative analysis was conducted through finite element analysis and theoretical calculation on the distribution law, parameter sensitivity, and structural longitudinal stress response of the vertical and horizontal foundation settlement and stiffness of the immersed tunnel. The results show that the pressure distribution at the base of the rock foundation section is small in the middle and large on both sides, and hollowing occurs in the middle. The soft foundation section is small at both ends and large in the middle, and hollowing occurs at both ends of the structure. The base stress value of the rock foundation and the soft foundation are relatively close, but the stiffness of the foundation differs greatly, and the rock foundation section is 14 times of the soft foundation section. The longitudinal stiffness of the rock foundation section is greatly affected by the parameters such as the thickness, modulus and preload of the cushion. The design thickness of the cushion layer in the rock foundation section should be used as the control standard for the entire line. The average shear force of the joint of the soft foundation section is about 3 times that of the rock foundation section. The study on the mechanical characteristics of gravel beds for immersed tube tunnels in heterogeneous ground provides an important reference significance for the promotion and application of immersed tube tunnels in complex geological conditions.

Key words: immersed tunnel; heterogeneous ground; gravel bed

0 引言

沉管隧道作为修建水下隧道主要工法之一,

具有埋置深度灵活、断面利用率高、防水性能好及地层适应性强等优点, 得到越来越多的工程选

收稿日期: 2023-10-14 修回日期: 2024-03-05

基金项目: 中国交建立项课题 (2014-ZJKJ-06)

作者简介: 张涛 (1983—), 男, 陕西西安人, 正高级工程师, 主任工程师, 主要从事岩土、隧道及地下工程设计研究。E-mail: zhangtao83@ccccltd.cn

用。沉管隧道基础作为解决基槽开挖作业所造成的槽底不平整,地基受力不均等问题的关键技术,受到国内学者的高度重视。张志刚等^[1]对港珠澳大桥海底沉管隧道可选的基础垫层进行多方面比选分析,提出了采用先铺碎石垫层作为隧道结构与地基之间的过渡构造。张庆贺等^[2]对国内外沉管隧道基础处理的主要方法进行了对比分析,得出不同方法在解决基槽稳定性、控制隧道沉降中的效果。魏纲等^[3]以浙江舟山沈家门港海底沉管隧道工程为例,对沉管隧道竖向不均匀沉降的计算方法及分布研究。冯海暴等^[4]通过深入分析研究国内外工程实例,针对相应的施工环境和沉管结构等指标,提出了不同地质和工况等条件下选取基础处理的原则。田建勃等^[5]通过对不同厚度碎石垫层在高应力下的室内模型试验和有限元分析,揭示了不同厚度碎石垫层的强度特性和变形特征。任耀谱^[6]结合襄阳沉管隧道项目,对内河流域首次采用先铺卵石法垫层进行了系统分析。王勇^[7]结合港珠澳大桥沉管隧道基础垫层设计方案,通过物

理模型试验分析了碎石级配、垄沟尺寸、施工偏位等对碎石垫层变形特性的影响;郭俊等^[8]通过建立等比例灌砂模型试验平台,检验了南昌红谷沉管隧道基础灌砂施工工艺设计的可行性,为实际施工提供了合理的施工参数。目前,国内对沉管碎石基床的研究主要围绕基础选型及施工工艺优化上,对碎石基床变形特性研究较少,尤其以岩基地层为主的沉管碎石基床更为鲜见,本文以大连湾海底隧道建设工程为依托,通过有限元分析及理论计算,对沉管隧道纵横向地基沉降及刚度的分布规律、纵向地基刚度参数敏感性 & 结构纵向受力响应问题进行量化分析。

1 工程概况

大连湾海底隧道建设工程沉管段隧道全长 3 035 m,共划分 18 个管节,根据地质勘察资料显示,沉管隧道南北区段(E1—E7、E13—E18 管节)基底主要为强风化及中风化基岩,中间区段(E8—E12 管节)主要为含碎石粉质黏土及角砾,见图1。主要岩土体物理力学计算参数见表 1。

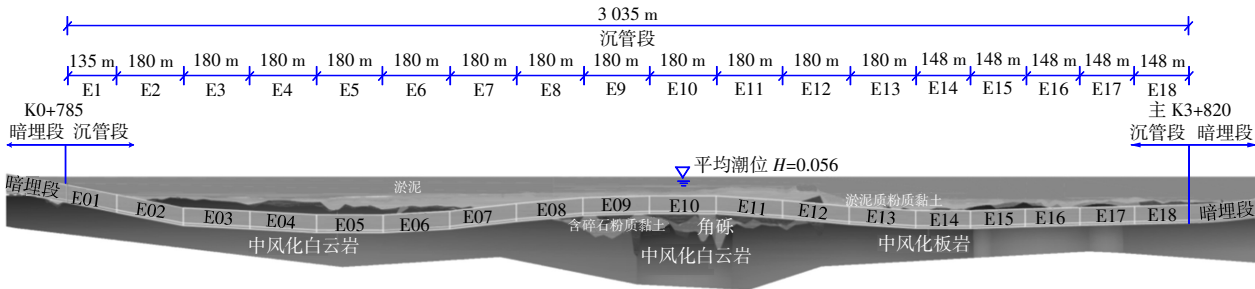


图 1 工程地质纵断面图
Fig. 1 Geological profile of the project

表 1 主要岩土体物理力学计算参数

Table 1 Main physical and mechanical calculation parameters of rock and soil mass

土层名称	饱和容重/(kN·m ⁻³)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)	模量/MPa		
				<i>E_{ood}</i>	<i>E₅₀</i>	<i>E_{ur}</i>
② ₁ 淤泥	16.58	13.17	8.95	1.59	1.59	4.77
③ ₁ 粉质黏土	19.35	26.30	15.00	5.39	5.39	16.17
⑤ ₂ 含碎石粉质黏土	18.84	26.78	16.50	5.06	5.06	15.18
⑥ 角砾	20.00	0.00	32.00	18.00	18.00	54.00
⑧ 红黏土	19.70	34.70	22.50	5.98	5.98	17.94
⑨ ₂ 强风化白云岩	22.00	40.00	28.00	30.00	30.00	60.00
⑨ ₃ 中风化白云岩	26.60	4 170.00	40.24	30 000.00	—	—
⑪ ₂ 强风化板岩	22.00	40.00	25.00	28.00	28.00	56.00
⑪ ₃ 中风化板岩	26.60	1.49	37.58	17 460.00	—	—

2 计算原理

沉管隧道的结构受力特点,选取典型横断面,运用有限元 Plaxis 岩土分析软件,按基槽开挖—

基床铺设—浮运安装—锁定回填—护面回填等施工工序进行全过程施工模拟,以期获得最不利施工工况下的沉管结构管底竖向沉降、基底应力及

地基刚度分布^[9]。沉管结构纵向地基刚度及结构受力响应计算主要采用自主研发的《沉管隧道结构-基础设计集成系统》进行分析。

3 沉管隧道纵横向地基沉降规律及刚度分布

3.1 横向沉降规律及地基刚度分布

选取典型断面分别对岩基、软基地层下的沉管基底沉降、应力及地基刚度分布进行对比分析,见图2。由计算可知,岩基地层下基底横向沉降、应力及刚度曲线均呈马鞍形,而软基主要呈抛物线形。当基底为岩基时,基底压力分布中间小两侧大,中间位置会出现脱空,而基底为软基时,应力分布与岩基正好相反,为两端小中间大,结构两端会出现脱空。

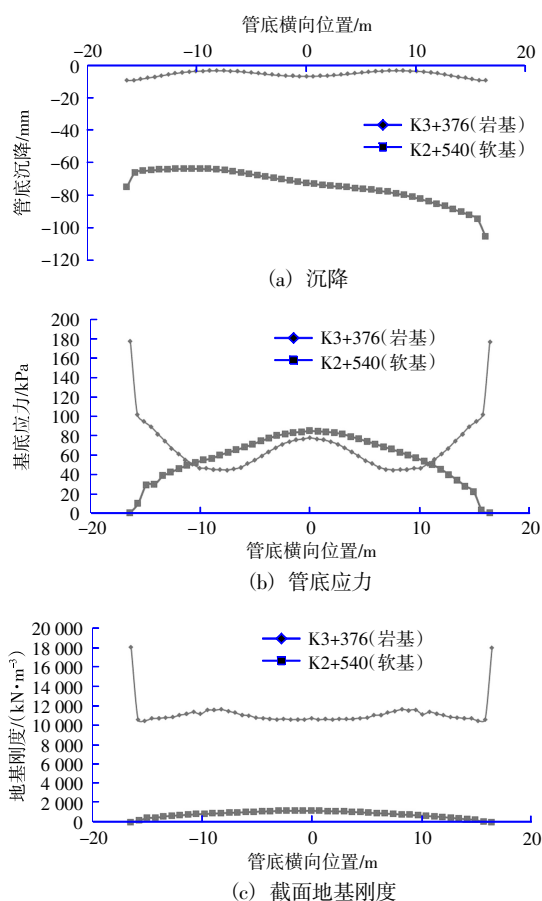


图2 不同地层横向地基沉降、应力、刚度分布规律对比

Fig. 2 Comparison of the distribution patterns of settlement, stress and stiffness of transverse foundations in different formations

岩基、软基基底平均应力值较为接近,分别为66 kPa、57 kPa,但地基刚度相差较为明显,岩基平均为11 092 kN/m³,软基平均为787 kN/m³,相差约14倍。

3.2 纵向沉降规律及地基刚度分布

由图3可以看出,岩基区段的地基沉降变化较为平缓,变化幅度为3.8~9.6 mm,而软基段地基沉降受基底土层厚度分布不均影响,沉降值变化大,变化幅度为10.2~110.1 mm。

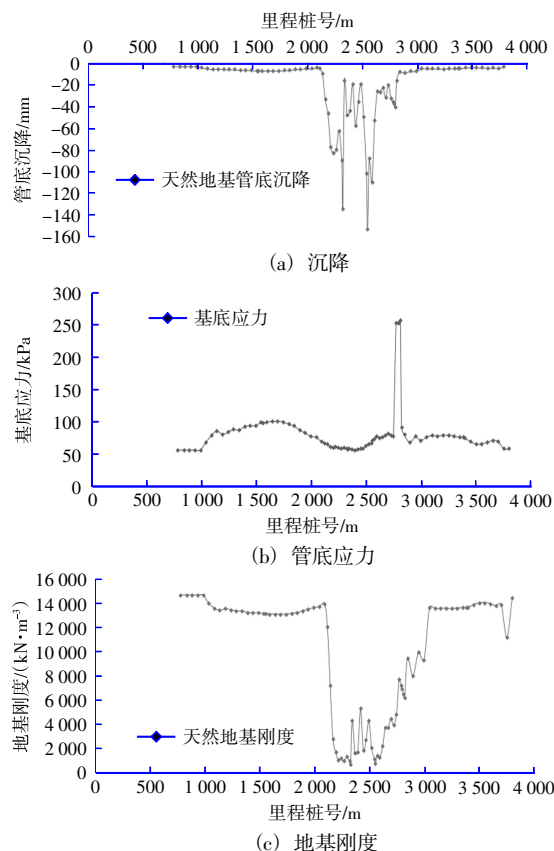


图3 纵向地基沉降、基底应力及刚度分布

Fig. 3 Longitudinal foundation settlement, substrate stress and stiffness distribution

纵向区间内沉管基底总体应力差值变化较小。仅在港池防波堤复建段(里程K2+765—K2+804)基底应力发生突变。纵向地基刚度在岩质地层向土质地层过渡(里程K2+115—K2+190)时,刚度明显骤降,其值由12 032 kN/m³降为1 730 kN/m³。里程K3+740因基底强风化岩层较厚,地基刚度呈V形变化。

4 软硬不均地层纵向地基刚度参数敏感性分析

4.1 垫层厚度变化的影响

由图4可以看出,在基岩段,以1.3 m厚度为基准,垫层厚度减小至0.95 m时,地基刚度增大17%;垫层厚度增大至1.8 m,地基刚度减小21%。因此可以判断,岩石地基中隧道沉降主要是由于垫层压缩变形引起的,碎石垫层厚度的变化对地基刚度影响较大。

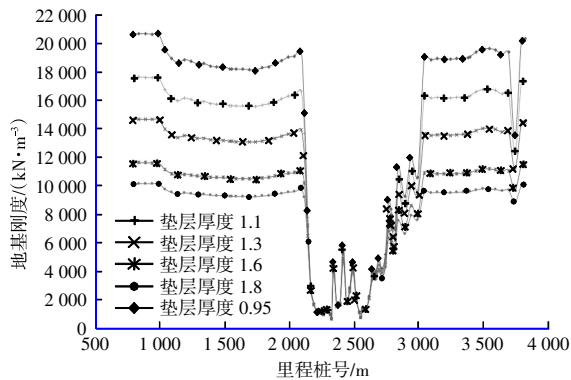


图4 沉管纵向地基刚度分布曲线(垫层模量 15 MPa)

Fig. 4 Longitudinal foundation stiffness distribution curve of immersed tube(Cushion modulus 15 MPa)

而在软基段,垫层厚度由 0.95 m 增大至 1.8 m 过程中,地基刚度减少约 5%,这是因为垫层以下的下卧土层其模量和碎石垫层为同一数量级,而垫层厚度占整个压缩层厚度比例较小,因此这种情况下垫层厚度差异对隧道竖向沉降影响很小,进而对总体地基刚度的影响不大。

4.2 不同垫层模量的影响

针对设计垫层厚度 1.3 m,分别考虑碎石垫层模量为 10 MPa 和 15 MPa 时对沉管纵向地基刚度变化影响,见图 5。上文分析已得出,岩石地基中隧道沉降主要是由垫层压缩变形引起的,因此碎石垫层模量的变化将直接引起地基刚度的改变。

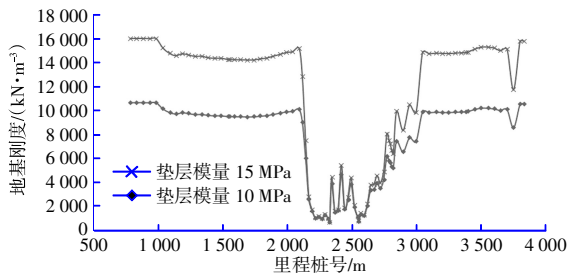


图5 不同碎石垫层模量下纵向地基刚度计算结果

Fig. 5 Calculation results of longitudinal foundation stiffness under different modulus of gravel cushion

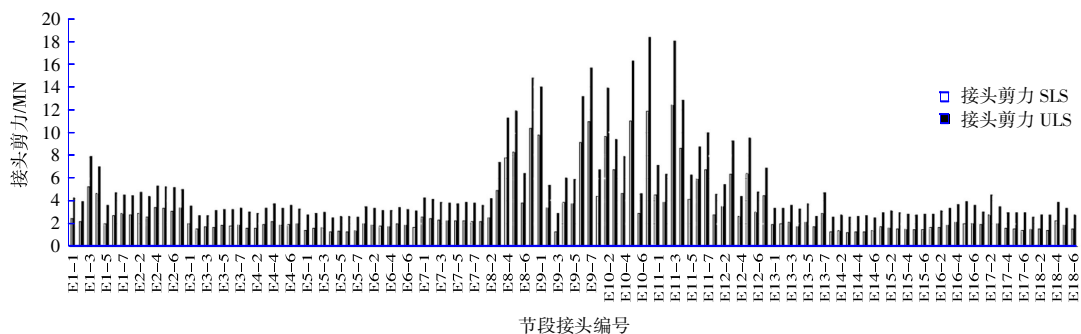


图7 节段接头剪力计算结果

Fig. 7 Calculation results of shear forces of segment joints

由图 5 可以看出,碎石垫层模量增加 50%,相应岩石地基段的地基刚度亦增加约 50%,碎石垫层模量与地基刚度呈线性关系。而在软基中,覆盖层越厚,垫层压缩变形占隧道沉降的比重越小,碎石垫层模量的变化对刚度的影响越小。

4.3 预压荷载的影响

结合碎石垫层整平抛石管工作状态,选取 30 kPa 的落管预压荷载对碎石垫层的影响,0~30 kPa 的回弹再压缩模量取 45 MPa,与不考虑预压荷载的纵向地基刚度对比,见图 6。结果表明,考虑回弹再压缩模量提高后,纵向地基刚度将得到进一步的提高,提高幅度与地基岩土性质有关,即岩石地基中预压荷载的影响程度大,增幅明显,而随着基底土层厚度的增加,预压荷载的影响逐渐减小。

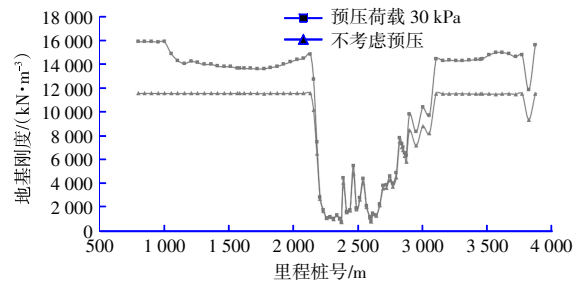


图6 不同预压荷载下纵向地基刚度计算结果

Fig. 6 Calculation results of longitudinal foundation stiffness under different preload loads

5 软硬不均地层沉管隧道结构纵向受力响应

从图 7 可知,软基段节段接头剪力在承载能力(ULS)及正常使用(SLS)极限状态组合作用下均大于岩基段,平均节段接头剪力约为岩基段的 3 倍,最大节段接头剪力在 E10-7(SLS: 12 MN, ULS: 18.2 MN)。管节的剪力大小、分布规律与节段接头较为一致,最大管节接头剪力在 E10&E11(SLS: 14 MN, ULS: 21 MN),见图 8。

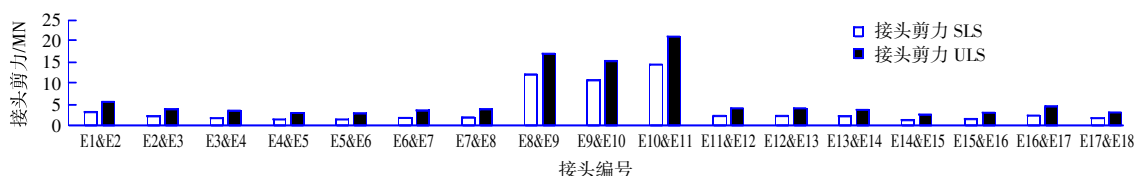


图8 管节接头剪力计算结果

Fig. 8 Calculation results of shear forces of pipe joints

根据接头剪力的分布来看,软基段的节段接头、管节接头剪力值均较大,施工期需对软基采取一定的地基处理,保证纵向刚度的均匀过渡,同时应按不同基础地层分别考虑结构接头抗剪构造措施。

6 结语

本文依托大连湾海底隧道建设工程,通过有限元数值模拟及理论计算,对软弱不均沉管隧道纵横向地基沉降、刚度及纵向结构受力响应进行了量化分析,结果表明:

1) 当基底为岩基时,基底压力分布中间小两侧大,中间位置会出现脱空,而基底为软基时,应力分布正好相反,为两端小中间大,结构两端会出现脱空。

2) 地层为岩基、软基时的基底应力值较为接近,但受地基沉降差异影响,地基刚度相差较大,岩基地基刚度约为软基段的14倍。

3) 岩基地基中隧道沉降主要为垫层压缩变形,垫层厚度是决定地基刚度的主要因素;而软基段中垫层厚度占整个压缩层厚度比例较小,垫层厚度差异对隧道竖向沉降影响很小,进而对总体地基刚度的影响不大。岩基段碎石垫层模量与地基刚度呈线性变化。

4) 岩基中预压荷载对地基刚度影响程度大,增幅明显,而软基中预压荷载对地基刚度影响较小。

5) 节段接头、管节接头最大剪力均位于软基段上,软基段的平均剪力约为岩基段的3倍,施工期需对软基采取一定的地基处理,同时对不同基础地层分别考虑结构接头抗剪构造措施。

软硬不均地层沉管隧道碎石基床力学特性研究为沉管法隧道在复杂地质条件下的结构受力问题提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 张志刚,付佰勇,刘晓东,等.港珠澳大桥海底沉管隧道基础垫层选型与总体设计[J].中国港湾建设,2018,38(1):34-38.
ZHANG Zhi-gang, FU Bai-yong, LIU Xiao-dong, et al. General design and type selection of foundation bedding of undersea

immersed tunnel for Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(1): 34-38.

- [2] 张庆贺,高卫平.水域沉管隧道基础处理方法的对比分析[J].岩土力学,2003(S2):349-352.
ZHANG Qing-he, GAO Wei-ping. Comparison analysis on treatment methods of pipe-sinking tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003(S2): 349-352.
- [3] 魏纲,朱昕光,苏勤卫.沉管隧道竖向不均匀沉降的计算方法及分布研究[J].现代隧道技术,2013,50(6):58-65.
WEI Gang, ZHU Xin-guang, SU Qin-wei. Calculation and distribution of vertical differential settlement in immersed tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(6): 58-65.
- [4] 冯海暴,苏长玺.沉管隧道基础处理方法研究分析[J].现代隧道技术,2019,56(1):33-38.
FENG Hai-bao, SU Chang-xi. Analysis of treatment methods for the foundation of the immersed tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(1): 33-38.
- [5] 田建勃,韩晓雷,于清桦,等.碎石垫层强度与变形特性试验研究和有限元分析[J].岩土力学,2014,35(1):83-89,97.
TIAN Jian-bo, HAN Xiao-lei, YU Qing-hua, et al. Experimental study and finite element analysis of strength and deformation characteristics of gravel cushion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 83-89, 97.
- [6] 任耀谱.襄阳汉江沉管隧道基础设计[J].中国水运,2019(6):107-109.
REN Yao-pu. Foundation design of submerged tube tunnel for Xiangyang Hanjiang River[J]. China Water Transport, 2019(6): 107-109.
- [7] 王勇.深埋沉管隧道基础碎石垫层变形特性试验研究[J].岩土力学,2015,36(12):3387-3392.
WANG Yong. An experimental study of deformation characteristics of gravel cushion for deeply immersed tube tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3387-3392.
- [8] 郭俊,吴刚,沈永芳,等.南昌红谷隧道基础灌砂施工工艺的模型试验研究[J].现代隧道技术,2017,54(6):56-62.
GUO Jun, WU Gang, SHEN Yong-fang, et al. Full-scale model test for sand-filling foundation construction technology in the Nanchang Honggu Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(6): 56-62.
- [9] 陈庆.超宽沉管隧道横向地基刚度数值模拟研究[J].公路,2018,63(6):325-328.
CHEN Qing. Numerical simulation of lateral foundation stiffness of super wide immersed tunnel[J]. Highway, 2018, 63(6): 325-328.