

锤击法沉桩对周边建筑振动影响有限元分析

林友勤¹, 王琦¹, 陈树辉², 朱三凡², 夏樟华¹

(1.福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

2.健研检测集团有限公司, 福建 厦门 361004)

摘要: 为研究锤击法沉桩振动影响, 以某工程为例, 使用 ABAQUS 建立三维有限元模型并施加无限元人工边界, 以实现锤击沉桩施工过程。通过实地测试数据拟合结果, 总结出锤击法施工下土体振动衰减规律。结合现有规范, 给出了锤击法施工对于3种不同建筑类型的影响范围。结果表明, 锤击法下土体质点速度呈衰减趋势, 振荡速度峰值在频率为0.5 Hz 时出现, 主频集中于3.8~6 Hz 之间, 属于低频振荡且受阻尼效应影响, 衰减较为缓慢。单桩锤击法施工条件下, 工业、民用和敏感建筑影响范围分别为12.5、14.0和22 m, 研究成果可为类似施工条件下的沉桩过程提供参考。

关键词: ABAQUS; 无限元; 锤击法; 振动; 衰减

中图分类号: TU473.1; X827 **文献标志码:** A

文章编号: 1672-4348(2019)04-0331-06

FEM analysis of hammering pile-driving effect on the surrounding buildings

LIN Youqin¹, WANG Qi¹, CHEN Shuhui², ZHU Sanfan², XIA Zhanghua¹

(1.College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2.Jianyan Testing Group Co., Ltd., Xiamen 361004, China)

Abstract: In order to study the vibration effects of hammering pile-driving, a three-dimensional finite element model was established by using ABAQUS and an infinite artificial boundary was applied to simulate the construction process of hammering pile driving. Based on the fitting results of field test data, the law of soil vibration attenuation under the hammer method was summarized. Finally, combined with the existing specifications, the influence scope of hammering pile-driving on three different building types was given. Results show that under the hammering method, the particle velocity of soil shows an attenuation trend, and the peak value of oscillation velocity appears when the frequency is 0.5 Hz, and the main frequency concentrates between 3.8~6 Hz, which is a low-frequency oscillation and is affected by the damping effect, and its attenuation is slow. Under the construction condition of single pile hammering method, the influence range ratios of industrial, civil and sensitive buildings are 12.5 m, 14.0 m and 22 m respectively. The research results can provide reference for the pile sinking process under similar construction conditions.

Keywords: ABAQUS; infinite element; hammering method; vibration; attenuation

随着城市化进展的加快以及建筑物体量的增大,天然地基已不能满足现有建设要求,桩基的应用日益增多。其中预制桩因其施工质量佳、进度快以及场地适应性高等优点被广泛使用。目前,

预制桩的沉桩方式有锤击法、静压法以及振动法3种^[1],其中锤击法和振动法会在土体中产生较大的振动并以应力波的形式向周围扩散,导致附近土体发生水平和竖向位移,尤其以竖向位移为

收稿日期: 2019-08-02

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2016J01231);厦门市建设局科技项目(XJK2017-1-5)

第一作者简介: 林友勤(1975-),男,福建福清人,高级实验师,博士,研究方向: 结构安全检测、防震减灾等。

甚,从而影响邻边建筑。因此,探究沉桩过程中振动问题,总结其振动衰减规律并给出大致影响范围对实际工程有借鉴意义。

国内外学者已就沉桩施工对周遭环境的影响作了很多研究。夏传勇^[2]详细讨论了沉桩振动的特点及对周围环境的影响,并推出了相应的对策。HenKe^[3]提出一个特殊的沉桩建模方式,并以桩截面为参数进行分析。张杨杨^[4]对打桩施工的影响机理及沉桩过程模拟进行理论分析,并结合上海地区河道陆域范围内某新建厂房项目,运用孔穴扩张理论及动力有限元法,计算分析打桩施工对邻近河道的影响。肖勇杰^[5]利用ABAQUS 有限元软件建立钢管桩振动贯入全过程的有限元模型,对贯入速率、贯入阻力及静载力与动载力比值影响因素进行分析。陈福全^[6]等通过数值方法对振动法施工工艺下的沉桩过程进行了分析,并以振动锤以及土体、预制桩为参数进行了分析。

但现有的研究大多集中于振动法沉桩施工,针对锤击法施工过程的研究较少,且多数研究仅针对试验或实测数据进行探讨,仅有的理论分析也是通过简化的方式进行定性分析,如通过二维有限元分析,与实际工程存在差别。

本文基于锤击法施工工艺,采用 ABAQUS 有限元软件结合无限元单元理论,进行三维有限元建模重现沉桩过程。以某房地产开发项目为工程背景,通过动态数据采集系统对施工现场进行数据采集。最后对比拟合实测数据验证模型的正确性,总结其振动衰减规律,并结合现有振动安全标准给出其影响范围,为今后相似沉桩工艺条件的工程提供参考。

1 桩身挤土振动影响特征

桩身入土时,周遭土体受压转移,原先空间由桩身替代。桩周一定范围内土体由于受压发生扰动以及应力位移重塑,大致可分为 4 个影响区块^[7-8],如图 1 所示。

工程地基是非完全弹性的半无限体,桩身入土时产生的振动以弹性应力波的形式在土体中传播,分为体波和面波,体波包含 P 波和 S 波,面波为 R 波。地基土体的振动由其振幅 A 、加速度 a 、质点速度 v 、频率 ω 、波的传播速度 V 等来表征^[9-10]。

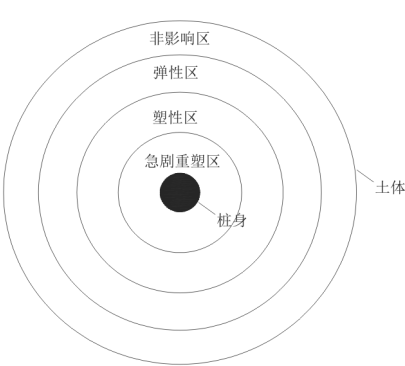


图 1 桩身挤土影响区块

Fig.1 Soil area influenced by pile-driving

2 三维有限元模拟

2.1 有限元-无限元耦合模型的建立

土体是半无限空间体,若截取地基过大将导致计算空间的浪费,目前有效的解决方式是截取适宜的有限域并施加人工边界,以解决土体动力问题^[11]。

现存的众多研究方法是截取有限区域并施以位移边界条件,该方法存在的问题是沉桩引起的应力波会在边界发生反射以及叠加,与实际结果造成差异^[12-13]。因此,本文采用 ABAQUS 自带的无限单元(图 2)进行人工边界的施加,在土体的四周以及底部施加无限元边界以解决波动反射问题,以削减边界效应带来的影响。

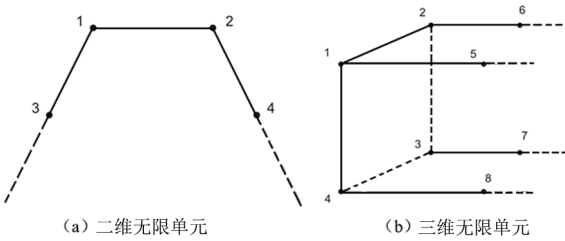


图 2 Abaqus 无限单元类型

Fig.2 Infinite element types of Abaqus

如图 3 所示,土体单元采用无限元-有限元耦合的方式进行建模,即土体近场区域(中间部分)采用 C3D8R 有限单元建模,边界区域(模拟远场区域)采用无限元单元 CIN3D8 进行建模;由于土质的复杂性以及土层多元性的存在,若将土体视为单一均质的材料会造成计算结果的误差,本文根据实际工程背景,将土体按实际厚度划分为多层并赋予各层土体相应的材料属性,使之与

实际情况更相近。预制桩采用圆管桩,由于桩并不是分析重点,故可简化为刚体进行模拟。

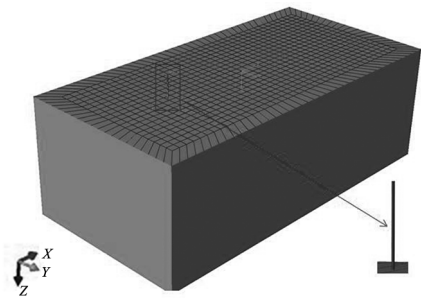


图 3 有限元-无限元耦合模型

Fig.3 Finite element-infinite element coupling model

2.2 有限元模型基本假定

- 1) 考虑初始地应力的影响,进行地应力平衡;
- 2) 考虑土体大变形,采用非线性及对称矩阵进行分析;
- 3) 土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,桩采用 rigid body 进行模拟;
- 4) 桩土采用法向硬接触,切向罚函数接触;
- 5) 使用 Abaqus 隐式动力分析。

2.3 锤击荷载模型

依据现有研究,采用锤击桩施工工艺沉桩时,其锤击荷载可简化为施加于桩顶的三角形或半正弦型的冲击荷载^[14]。如图 4 所示,三角形冲击荷载最大冲击力可由冲击锤类型、落距等决定,依据实际工程,冲击锤型号为 HD62 筒式柴油锤,锤重 6.2 t,落距 2 m,根据现场实测最大冲击力为 650 t。

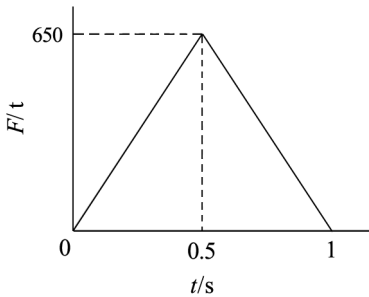


图 4 锤击三角形荷载

Fig.4 Triangular load of the hammering

3 现场测试

现场测试以某房地产建设工程为背景,采用磁电式速度传感器置于平整夯实的场地平面上进行振动测试,为能反映不同地质条件下土体振动

的响应,以及打桩振动对不同方位土体的影响,在桩基施工范围内选择 3 条不同方位的测线,实测打桩过程的振动数据。每条测线布置 4 个测点,相邻测点间距 20 m,每测点测量 3 个方向数据,共计 12 个通道,具体测线及测点的布置如图 5。

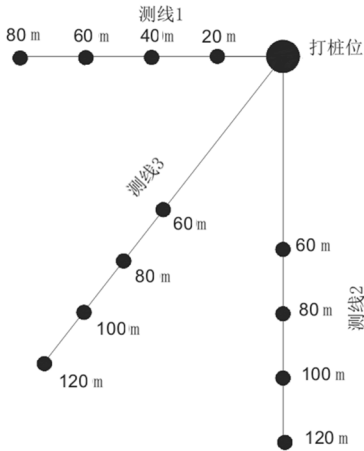


图 5 测线测点布置图

Fig.5 Layout of measuring lines and points

选取距离打桩位为 60、80、100、120 m 的 4 个测点,并将其 3 个方向的速度峰值汇总于表 1。

表 1 实测测点振动速度峰值

Tab.1 Measured peak values of the vibration velocity of the measured points

测点 编号	测距/ m	测点振动速度峰值/(mm·s ⁻¹)		
		径向	切向	竖向
1	60	0.310	0.358	0.541
2	80	0.202	0.238	0.403
3	100	0.184	0.230	0.340
4	120	0.121	0.164	0.147

4 实测数据与有限元模型对比分析

根据地质提供土体条件修正模型参数,并以实测最大冲击力施加于桩顶。

4.1 有限元计算参数

截取土体有限区域长×宽×高=200 m×100 m×70 m,桩长取 15 m 的 PHC 桩,土层参数如表 2。

表 2 土层参数
Tab.2 Soil parameters

层号	土层	厚度/ m	γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^3$)	E / MPa	μ	c / kPa	Φ / ($^\circ$)
1	素填土	3.2	17.8	4.1	0.30	12.8	11.0
2	淤泥	12.4	16.5	2.1	0.20	8.9	7.9
3	粉质黏土	6.6	19.0	7.1	0.26	40.6	16.4
4	黏性土	5.8	19.3	7.4	0.24	24.3	20.5

4.2 结果与分析

在模型轴向方向上选取 4 个测点,分别距桩心 60、80、100 以及 120 m。将 4 个测点,各 3 个方向的实测测点振动速度峰值与数值模拟测点振动速度峰值进行比较,得到径向、切向、竖向 3 个方向下的振动速度峰值随测距变化的比较结果,如图 6 所示。

由图 6 对比结果可知,数值模拟结果与实测结果较为吻合,皆有明显的衰减趋势,且各测距所对应振动速度峰值相近,误差仅在 $\pm(0.05 \sim 0.10)$ mm/s 之间,因此可认定该模型能较好地重现沉桩振动影响过程。为了进一步揭示锤击法工艺下的土体振动规律,将速度时程曲线经过快速傅里叶变换(FFT),得到相应的频率与速度幅值曲线,如图 7 所示。

对比图 7 可见,锤击法下速度幅值在频率为 0.5 Hz 时达到峰值,继而呈振荡衰减,且主频较低,在 3.2~6 Hz,属于低频振荡。伴随着距离的增加,速度幅值逐渐减小,出现这样的原因是因为材料存在着阻尼,振动幅值受阻尼效应影响而呈衰减趋势,从衰减幅度亦可知低频振荡在阻尼效应下的衰减较为缓慢。

4.3 振动影响评价

参照《建筑工程容许振动标准》(GB 50868-2013)^[15]规定,建筑施工振动对建筑结构影响评价的频率范围应为 1~100 Hz。建筑结构基础和顶层楼面的振动速度时域信号测试应取竖直和水平 3 个主轴方向评价指标中的峰值 PPV 及其对应的振动频率。

锤击法属于低频振荡,频率在 10 Hz 以内,故以小于 10 Hz 规定的容许标准评价振动影响范围,绘出 100 m 内的质点 PPV 图并与 3 种建筑类型容许标准值进行比较,如图 9 所示。

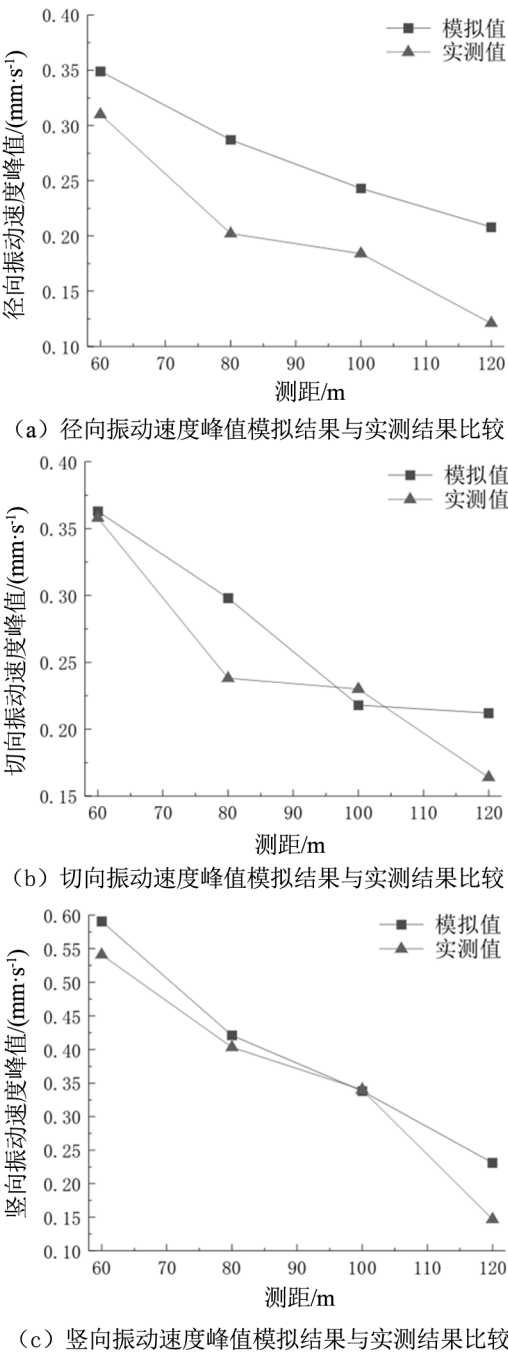


图 6 模拟结果与实测结果对比图
Fig.6 Comparison between the simulated and measured results

由图 9 可得,单桩锤击法施工条件下,以桩心为中心,工业建筑影响范围为 12.5 m,民用建筑为 14 m,敏感建筑为 22 m。

因此在对舒适度要求较高的场所,应避免采用锤击法施工。

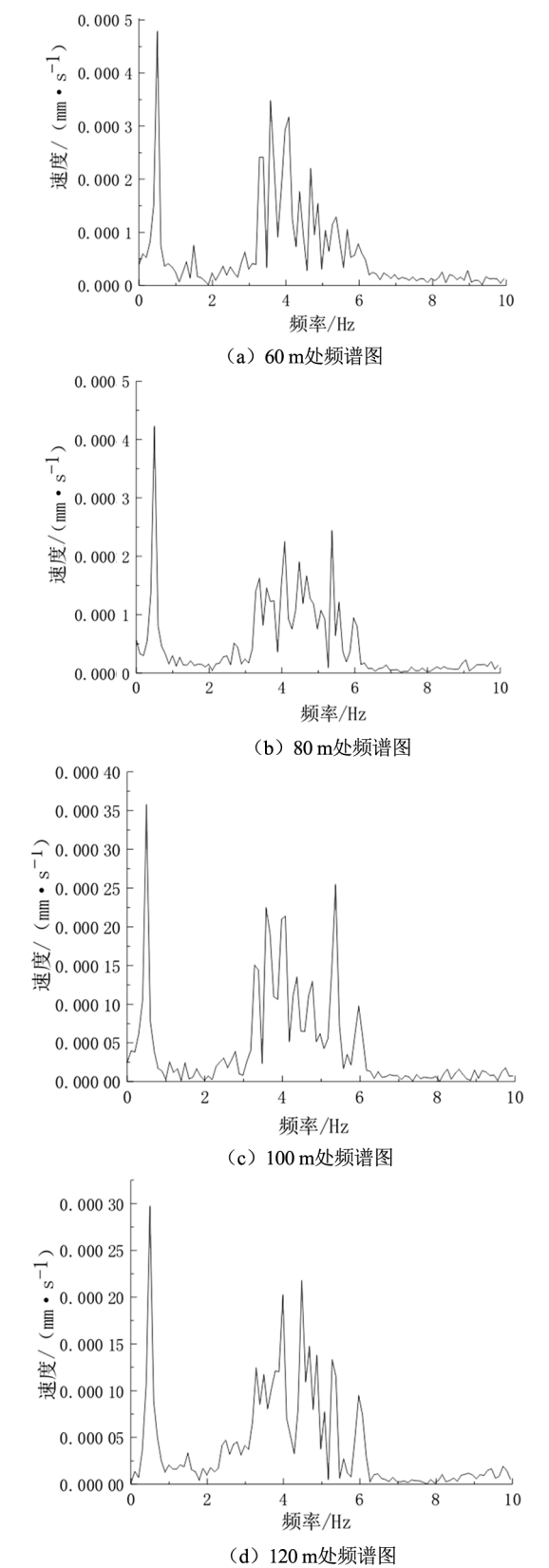


图 7 锤击法频谱图

Fig.7 Frequency spectrum of the hammering method

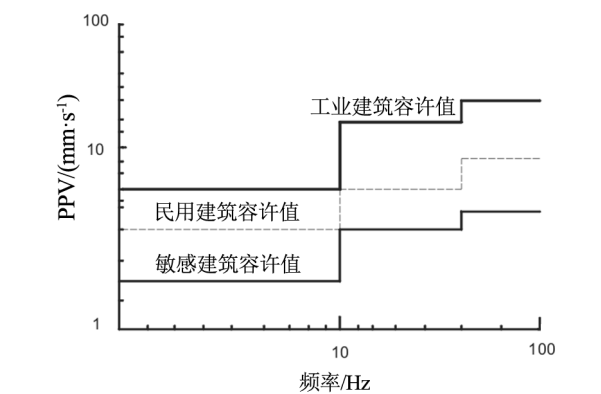


图 8 建筑容许振动标准图

Fig.8 Standards of allowable vibrations of buildings

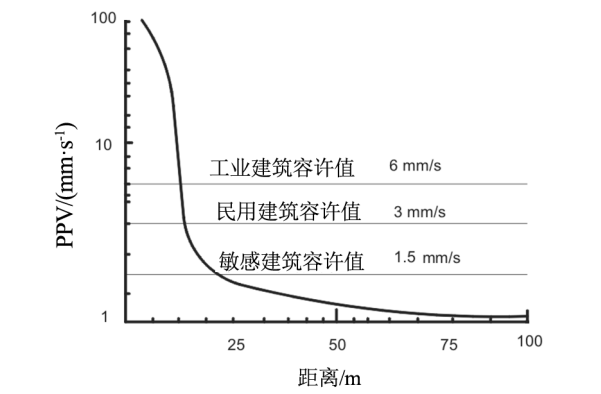


图 9 质点速度曲线及容许值

Fig.9 Particle velocity curves and allowable values

5 结论

- 1) 由于阻尼的存在,锤击法下土体振荡质点速度呈衰减趋势。
- 2) 锤击法施工中,土体振荡速度峰值在频率为 0.5 Hz 时出现,主频集中于 3.8~6 Hz,属于低频振荡,且低频振荡受阻尼效应影响下的衰减较为缓慢。
- 3) 通过现有规范可得,单桩锤击法施工条件下,以桩心为中心,工业建筑影响范围为 12.5 m,民用建筑为 14 m,敏感建筑为 22 m。

参考文献:

- [1] 宋碧亚. 基于 ABAQUS 的沉桩过程数值分析[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2016.
- [2] 夏传勇, 姚仰平, 罗汀. 沉桩振动的环境影响评价[J]. 北京航空航天大学学报, 2003(6): 539-543.
- [3] HENKE S. Influence of pile installation on adjacent structures[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 34(11): 1191-1210.
- [4] 张杨杨, 吴丹, 杭旭超. 打桩施工对邻近河道的影响[J]. 水运工程, 2019(2): 181-184, 190.
- [5] 肖勇杰. 基于 Abaqus 的大直径钢管桩高频振动贯入速率有限元分析[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(9): 105-112.
- [6] 陈福全, 雷金山, 汪金卫. 高频液压振动锤沉桩的打入性状分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(1): 41-47.
- [7] 李家华, 单恒年, 陈祥. 沉桩挤土效应对桩周土体径向位移数值分析[J]. 水道港口, 2018, 39(4): 490-495.
- [8] 施建勇, 彭劼. 沉桩挤土作用的有限元分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002(1): 109-114.
- [9] 肖正龙. 基于 Abaqus 静压沉桩全过程响应分析的方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [10] 李兴洋. 基于 Abaqus 的扩大头静压桩连续贯入数值模拟研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
- [11] 李婷. 考虑动态贯入过程沉桩挤土效应有限元分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- [12] 王嘉勇, 肖成志, 何晨曦. 静压桩对邻近埋地管道性能影响的数值分析[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(2): 322-329.
- [13] 陈泓澍. 锤击桩动应力作用下的有限元分析[J]. 福建建材, 2010(5): 32-34, 39.
- [14] CHRISOPOULOS S. VOGELSANG. A finite element benchmark study based on experimental modeling of vibratory pile driving in saturated sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 122: 248-260.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑工程容许振动标准: GB 50868-2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

(责任编辑: 陈雯)

(上接第 325 页)

- [7] 李少莉, 蒋小鹏. 简支梁桥桥面连续常见病害成因分析及处治措施[J]. 中国公路, 2012(13): 121.
- [8] WING K M, KOWALSKY M J. Behavior, analysis, and design of an instrumented link slab bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(3): 331-344.
- [9] ULKU E, ATTANAYAKE U, AKTAN H. Jointless bridge deck with link slabs[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2131(1): 68-78.
- [10] 庄一舟, 徐亮, 程俊峰, 等. 简支梁桥桥面连续结构力学特性理论分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(7): 73-85.
- [11] 林雄. 简支梁桥 ECC 桥面连接板研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [12] QIAN S, LEPECH M D, KIM Y Y, et al. Introduction of transition zone design for bridge deck link slabs using ductile concrete[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(1): 96-105.
- [13] SABER A, ALETI A R. Behavior of FRP link slabs in jointless bridge decks[J]. Advances in civil Engineering, 2012, 2012: 1-9.
- [14] 中交公路规划设计院. 公路桥涵设计通用规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [15] 赖焕林. 简支梁桥桥面连续结构的受力分析与设计研究[D]. 福州: 福州大学, 2015.
- [16] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362-2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(责任编辑: 方素华)