

# 高架桥桩基加载顺序的力学响应分析

罗国成

中铁建大桥工程局集团第一工程有限公司, 辽宁 大连 116000

**[摘要]** 为了研究桩基加载对高架桥结构的力学响应以及变形规律, 文中采用 ABAQUS 仿真施工软件对高架桥结构桩基加载施工作业进行模拟, 并对不同工况下桩基施工对高架桥稳定性进行分析。并以青岛东岸产业园区高架桥建设项目为依托, 将现场监测数据与文中模拟施工数据对比, 结果表明: 现场监测数据与数值模拟结果趋势相同、位移差异不大, 验证了文中方法的准确性, 为地铁施工稳定性分析提供了一种新的方法。

**[关键词]** 桩基加载; 高架桥; 力学响应; 沉降变形

DOI: 10.33142/ec.v7i8.12957

中图分类号: TU473

文献标识码: A

## Mechanical Response Analysis of Loading Sequence for Viaduct Pile Foundation

LUO Guocheng

China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group 1st Engineering Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

**Abstract:** In order to study the mechanical response and deformation law of the viaduct structure under pile foundation loading, the ABAQUS simulation needle construction software was used to simulate the pile foundation loading construction operation of the viaduct structure, and the stability of the viaduct under different working conditions was analyzed. Based on the viaduct construction project in Qingdao East Bank Industrial Park, the on-site monitoring data was compared with the simulated construction data in the article. The results showed that the trend of the on-site monitoring data was the same as that of the numerical simulation results, and the displacement difference was not significant, which verified the accuracy of the method in the article and provided a new method for the stability analysis of subway construction.

**Keywords:** pile foundation loading; viaduct; mechanical response; settlement deformation

### 引言

伴随着我国经济建设的高速发展, 城市建设步伐愈发加快。而地铁作为城市交通的主要出行方式, 受到越来越多人的关注<sup>[1]</sup>。桩基加载作业作为一项地铁高架桥建设的风险点, 也是工程建设研究的热点<sup>[2]</sup>。在高铁桥桩基施工中, 施工过程的载荷传导加之施工引起的周边土体的变化, 极易诱发高架桥沉降、拱顶沉陷、桩基偏斜等事故的发生, 需要在地铁隧道施工与监测过程中引起足够的重视<sup>[3]</sup>。

曾东洋等<sup>[4]</sup>通过三维数值模拟, 对比研究在地铁区间并行长距离隧道侧穿邻近桩基条件下, 洞内深孔注浆和洞外跟踪注浆对桥梁桩基的影响效果; 李波<sup>[5]</sup>基于南京地铁盾构区间隧道近距离下穿铁路桥梁桩基施工分析得出, 盾构施工引起的地层扰动可导致桩基产生附加力, 降低桩基的承载力。张汎等<sup>[6]</sup>根据某地铁穿越桥桩工程, 认为控制地层位移和隧道收敛变形, 对减小桥桩的影响具有重要作用<sup>[7]</sup>。

本文以青岛东岸产业园区高架桥施工建设项目为工程背景, 采用 ABAQUS 仿真施工软件模拟的高架桥在施工过程中各构件以及整体的力学效应和沉降变形分析。为日后真实项目施工过程中可能出现的问题进行预警。

### 1 工程概况

本标段高架桥为“桥~建”组合体系岛式高架站, 高架桥桥梁部分为高架桥的主要受力部分, 采用的空间刚

架式结构。桥墩基础采用多桩承台, 每墩下设置一个整体式承台。高架桥单榀结构采用“IT”型, 除桥墩盖梁和站厅层立柱设置了预应力外, 其余构件均为普通钢筋混凝土结构。桥梁和房建结构合一修建, 桥梁的盖梁、墩柱、基础为桥梁结构和房建结构共有, 桥梁的横向框架通过房建结构纵向梁板整体联结, 形成空间框架体系。高架桥由上到下各土层性质见下图 1。

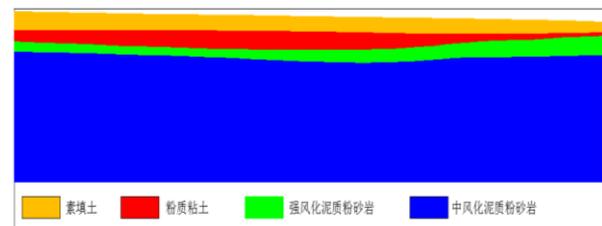


图 1 璜溪站地质剖面图

## 2 仿真模型加载试验

### 2.1 加载试验方案

本高架桥采用钻孔灌注桩作为上部高架桥结构的基础。本文将对钻孔灌注桩的轴力、侧摩阻力, 以及荷载沉降曲线性状、土体塑性区的发展情况等进行研究。采用 2D 模型。截取模型结构横截面如图 3 所示, 在 ABAQUS 中建立的 2D 模型如图 2 桩基础模型所示, 图中不同的颜色

表示不同的材料，其中各项材料参数（混凝土参数和土体参数）均与前面各节保持一致。

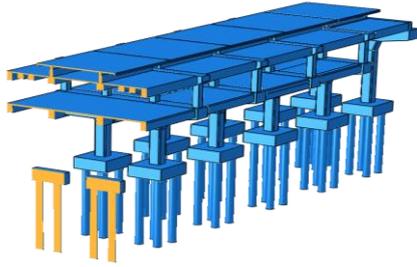


图2 2D模型选取截面

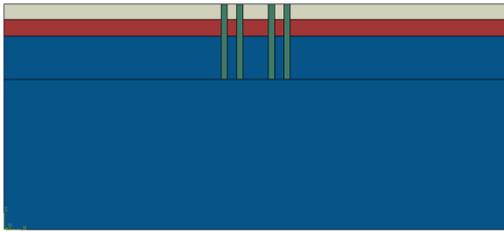


图3 桩基础模型

本部分内容通过定义在桩顶处位移约束的方式施加荷载，使桩顶位移在 60s 内下沉 0.05 倍桩径，即 50mm 时表示桩达到极限承载力。在此基础上通过改变加载顺序设置以下五组实验：

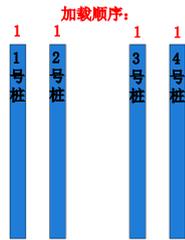
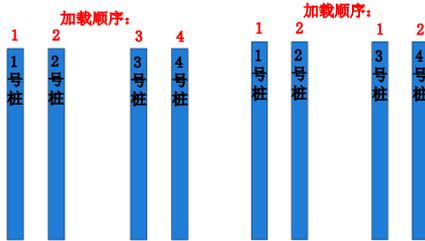
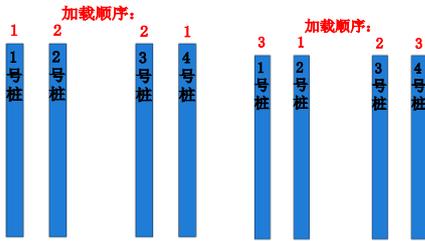


图4 初始组加载顺序



a. 第一组加载顺序

b. 第二组加载顺序



c. 第三组加载顺序

d. 第四组加载顺序

图5 不同加载顺序的桩基础

## 2.2 物理力学性质分析

### (1) 荷载沉降曲线

如上所述，在此基础上利用 ABAQUS 进行前处理和计算，在计算结果 ODB 文件中提取桩基础顶部中心点的 S22 应力和竖直方向位移，并将前者与桩的面积相乘即可得到荷载与沉降的对应数据。

初始组的荷载沉降关系对应数据如图 6、图 7 所示。

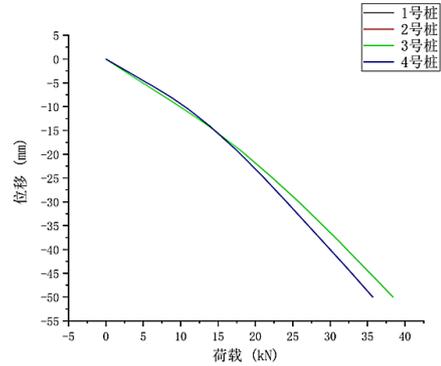


图6 荷载沉降曲线（初始组）

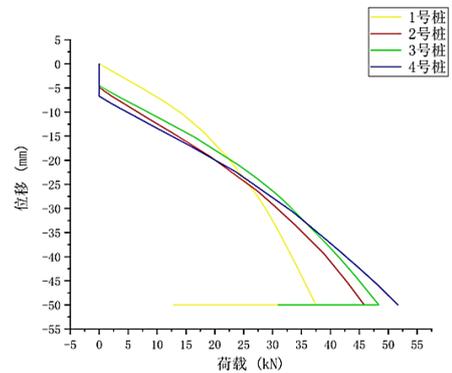


图7 荷载沉降曲线（第一组）

根据上图可知，当荷载同时施加时，位于内侧的桩基础极限承载力较大，约 38.4kN，而位于外侧的桩基础极限承载力稍小约 35.7kN，两者相差约 2.7kN，内侧桩基础的承载力比外侧桩基础的承载力高约 8%。第一组荷载沉降曲线如图 7 荷载沉降曲线（第一组）所示。根据荷载位移曲线及其对应数据，较早阶段施加荷载的桩基础在达到指定沉降时对应的荷载较小，较晚阶段施加荷载的桩基础在达到指定沉降时对应的荷载较大。

根据图 6、图 7 的数据曲线对比，可以推知，这种指定沉降对应荷载的时间效应在加载前期相对于加载后期更为明显，两个桩基础较近距离相对于较远距离更为明显。

在桩基础加载完毕后，随着后续桩基础的荷载施加，加载完毕的桩基础出现位移不变、荷载减小的现象。这与岩体流变性质中“松弛”的定义一致。

并根据上图对比可以推知，这种沉降不变而荷载减小的松弛效应在加载前期相对于加载后期更为明显，两个桩基础较近距离相对于较远距离更为明显。

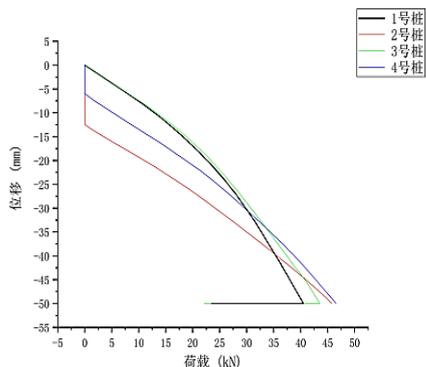


图8 荷载沉降曲线（第二组）

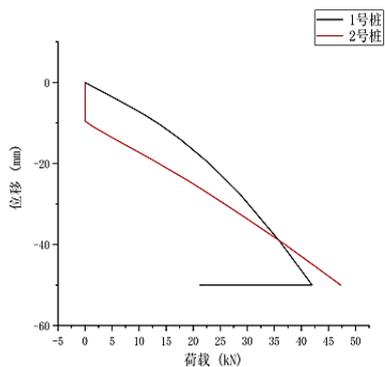


图9 荷载沉降曲线（第三组）

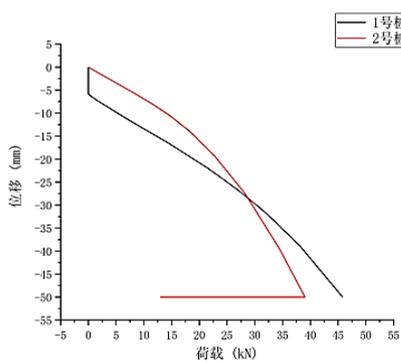


图10 荷载沉降曲线（第四组）

由图8、图9、图10所示，虽然加载顺序各不相同，但是均符合早期荷载较小，后期荷载较大，且较早加载的桩基础存在松弛现象的普遍规律。

初始组的荷载-沉降曲线如图11初始组轴力-深度曲线所示，图中1号桩和4号桩的曲线重合，2号桩和3号桩的曲线重合，只显示两条曲线。

根据下图可知，当荷载同时施加时，位于内侧的桩基础轴力较大，位于外侧的桩基础轴力较小；桩基础上部轴力较大，下部轴力较小。轴力随深度变化曲线如图12所示。

根据轴力随深度变化曲线及其对应数据，较早阶段施加荷载的桩轴力较小，变化相对比较平缓，较晚阶段施加荷载的桩轴力较大，变化比较剧烈；桩基础上部轴力较大，下部轴力较小。由于各桩的对称关系，此处只列出1号和

2号桩的数据，即 Path-1~Path-4 的沉降数据。桩侧沉降曲线如图6始组桩侧沉降曲线所示。在不同桩的相同侧，沉降变化趋势相同，外侧桩沉降普遍大于内侧桩；在相同桩的不同侧，其上部分差距较小，其下部分差值变大。内侧沉降普遍大于外侧。在相应侧摩阻力随深度变化的曲线如图13侧摩阻力随深度分布所示。

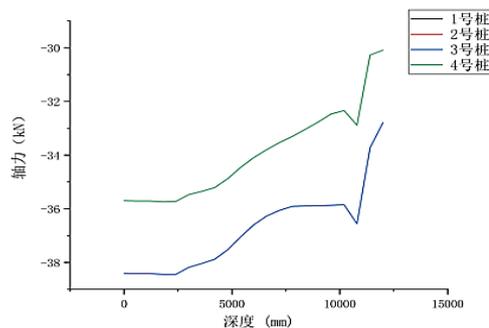


图11 初始组轴力-深度曲线

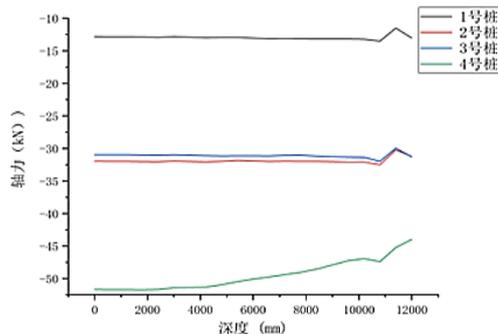
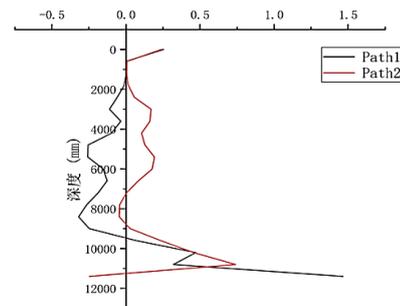
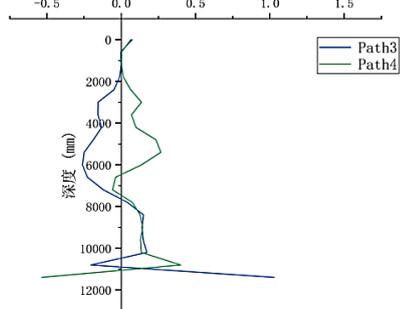


图12 第一组轴力-深度曲线



(a) 1号桩



(b) 2号桩

图13 侧摩阻力随深度分布 (MPa)

分析上图可知较晚施加荷载的桩侧摩阻力更明显分步施工时，先灌注的桩应力较小，后灌注的桩应力较大，这是由于早期土体较为疏松，成桩后土体受挤压变得密实，从而对桩体产生较大的反作用力。如图 14 所示。

同时加载时塑性区的发展过程如图 15 塑性区发展过程（初始组）所示，由图可知塑性区发展过程可以分为四个阶段：

阶段(a)：在桩基础底部外侧尖角处塑性区开始出现；

阶段(b)：塑性区从桩基础底部外侧尖角处向下发展，在桩基础底部约 1 倍桩长的深度处出现向内靠拢的趋势；

阶段(c)：在桩基础底部塑性区逐渐连通并扩散，在距桩基础底部约 1.5 倍桩长深度处有靠拢趋势的塑性区逐渐接近，并在其上方伸出；

阶段(d)：基础底部塑性区完全贯通，上一阶段伸出的塑性区部分连通，最终形成类“X”形状。

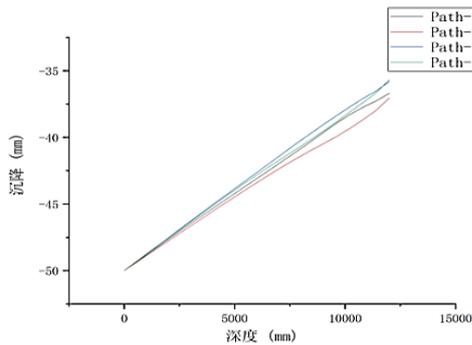


图 14 初始组桩侧沉降曲线

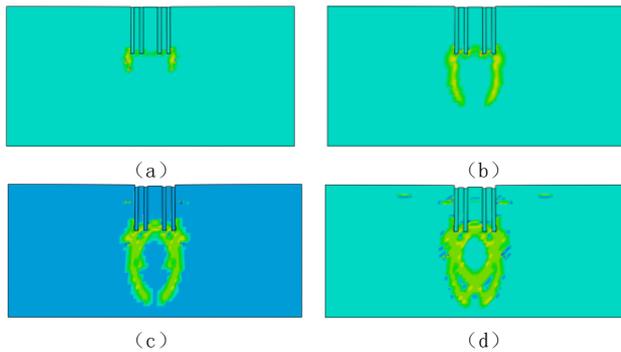


图 15 塑性区发展过程 (初始组)

### 3 主体动力下局部稳定性研究

#### 3.1 位移时程反应

分析各工况下承台的位移时程曲线（见图 16-图 21）可知，承台在地震荷载的作用下表现出良好的波动性，并且在 6 秒时在 Y 轴反方向出现位移峰值，此时地震荷载对应的加速度时程曲线也达到峰值。

工况 1 对应荷载作用下盖梁的位移时程曲线表现出较强的波动性，而工况 2 对应荷载作用下盖梁的位移时程曲线则呈现出递增的趋势，结合各工况对应荷载可以推知在罕遇地震荷载作用下高架桥主体结构盖梁及以下部分

存在进入塑性阶段的可能性，混凝土也可能存在一定程度上的损伤。

对于同一部件，在不同工况对应的地震作用下的位移时程曲线形状基本相同，变化趋势也较为相近，随着地震作用的增强，其相应的最大位移随之增大；对不同部件，在同一工况对应的地震作用下位移时程曲线的相似性并不明显，相同地震作用下，各个部件的位移变化并没有随之增强。

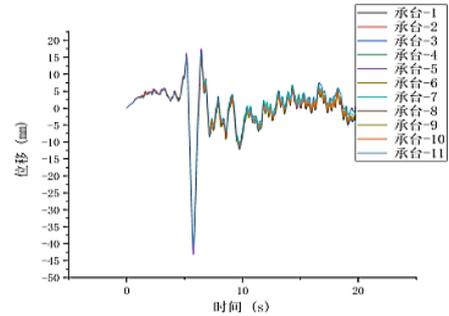


图 16 承台位移时程曲线 (工况 1)

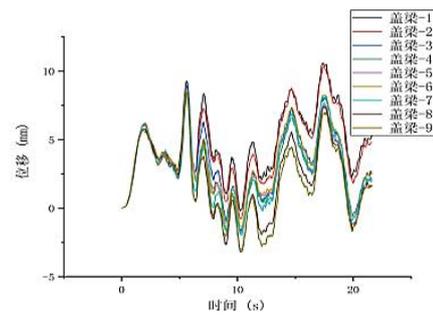


图 17 盖梁位移时程曲线 (工况 1)

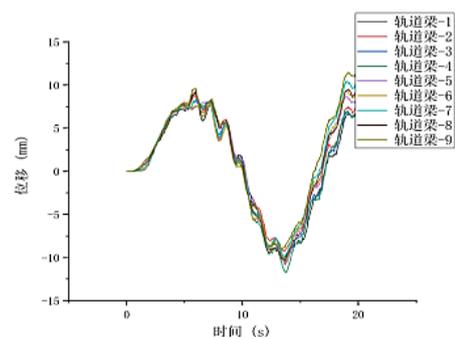


图 18 轨道梁位移时程曲线 (工况 1)

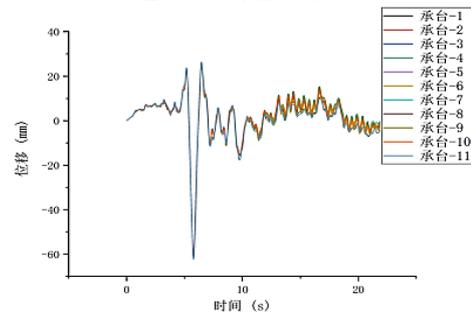


图 19 承台位移时程曲线 (工况 2)

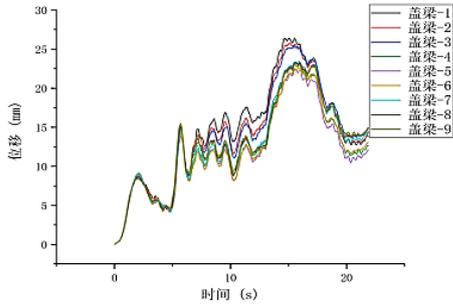


图 20 盖梁位移时程曲线 (工况 2)

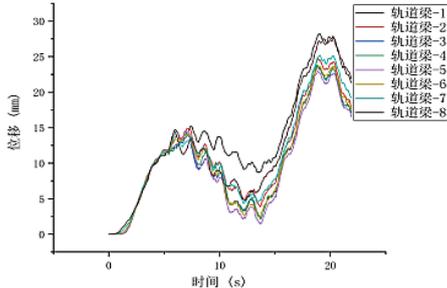


图 21 轨道梁位移时程曲线 (工况 2)

### 3.2 混凝土损伤情况分析

分析高架高架桥在地震荷载作用下的计算结果可知,结构基础部分和梁、柱体系等部件出现了不同程度的损伤。由图 22、图 23 可知,受拉损伤产生的范围比受压损伤的范围分布更广泛。

梁柱体系的损伤部位主要出现在轨道梁和盖梁上,站厅层立柱未出现损伤。这其中除了混凝土材料特性的原因之外,与结构承受的荷载——地震荷载的性质也有关。

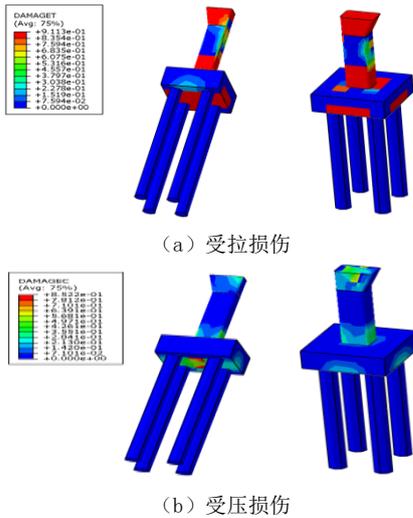
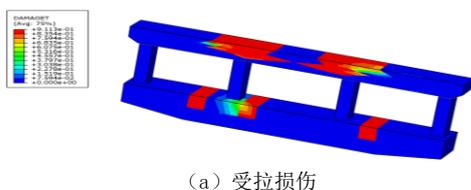
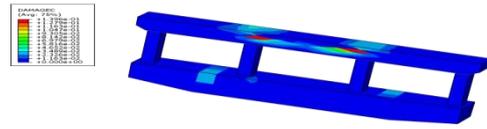


图 22 基础损伤图示



(a) 受拉损伤



(b) 受压损伤

图 23 梁柱损伤图示

## 4 结论

(1) 本文研究了高架高架桥施工过程中的局部稳定性问题研究了桩基加载顺序的问题,通过不同的模拟桩基加载试验,得到了最优的桩基加载顺序。对高架桥主体的分析主要是对局部构件的分析,通过分析在动力因素下,混凝土的损伤情况,得知混凝土最易受损位置,进而进行局部加强。

(2) 通过对高架桥基础、高架桥主体局部稳定性的研究,可以分析出高架桥在施工过程中需要注意的施工步骤和合理的施工顺序,将计算得到的高架桥力学响应与施工相结合,提出相应的施工建议,能最大程度地减少高架桥施工所面临的安全问题,并且提高高架桥的耐久度,产生经济效益。

(3) 在高架桥桩基施工方面,在不同桩的相同侧,应力变化趋势相同,内侧桩应力普遍大于外侧桩应力;在相同桩的不同侧,应力变化趋势不同,以大约 5m 到 7.5m 深度处为界,其上部分变化方向相同,外侧应力大于内侧;在桩基础成孔灌注环节,相对于外侧桩更应当对其成桩质量加以把控。

### 【参考文献】

[1] 刘小林. 桥梁桩基施工诱发振动对临近建筑物的影响分析[J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(10): 84-86.  
 [2] 吕伟. 交通荷载下穿越溶洞型桩基承载特性及动力响应研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.  
 [3] 肖英楠. 桩基础桥在斜坡下的受力分析与防护措施[J]. 技术与市场, 2022, 29(8): 132-133.  
 [4] 王安华, 杨国平. 码头设计中桩基有效计算长度分析[J]. 水运工程, 2021(10): 168-172.  
 [5] 俞剑, 朱俊霖, 黄茂松, 等. 基于虚拟加载上限法和黏土小应变特性的桩基 p-y 曲线[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2029-2036.  
 [6] 李森, 俞剑, 黄茂松. 饱和黏土中不同刚度单桩水平循环加载离心试验[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 948-954.  
 [7] 王景梅, 蒋浩然. 大直径阶梯型变截面桩水平承载特性试验研究与理论分析[J]. 公路, 2020, 65(3): 141-147.

作者简介: 罗国成 (1987.4—), 男, 汉族, 工程师, 辽宁省大连市人, 本科, 主要从事隧道与地下工程、桥梁及道路施工。