

孙振杰. 城市高架桥分块预制承台的抗震性能分析[J]. 华南地震, 2021, 41(2): 119–124. [SUN Zhenjie. Seismic Performance Analysis of Prefabricated Block Caps of Urban Viaducts[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(2): 119–124]

城市高架桥分块预制承台的抗震性能分析

孙振杰

(上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200433)

摘要: 目前大部分的城市高架桥梁承台仍然采用现浇结构, 其施工工序较多, 工期长。为了提高桥梁快速化施工水平, 针对上海市济阳路(卢浦大桥-闵行区界)快速化改建工程项目, 提出了一种分块预制承台结构形式, 并采用 FLAC^{3D} 软件模拟了地震作用下预制承台结构的力学特性。通过数值模拟分析了承台相对刚度、桩基直径、承台配筋率等因素对预制承台结构的抗震性能影响。结果表明: 拼装预制承台的抗震特性较好, 预制拼接承台的沉降一致, 左右两半沉降均相同, 而在预制承台与立柱接触面竖向位移较大; 以及桩基直径和承台配筋率存在合适值对承台拼接处受力性能较好。

关键词: 分块预制承台; 快速化施工; 抗震性能; 承台配筋率

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2021)02-0119-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.02.17

Seismic Performance Analysis of Prefabricated Block Caps of Urban Viaducts

SUN Zhenjie

(Shanghai Road and Bridge(Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: The cast-in-place structure are still adopted in most of the urban viaduct construction, with many construction procedures and long construction periods. In order to improve the level of the rapid construction of the bridge, in view of the rapid reconstruction project of Jiyang Road (Lupu Bridge-Minhang District) in Shanghai, this paper proposes a form of prefabricated block pile caps and uses FLAC^{3D} software to simulate the mechanical properties of precast cap structure under earthquake action. The influence of factors such as the relative stiffness of the cap, the diameter of the pile foundation and the reinforcement ratio of the cap on the seismic performance of the precast cap structure are analyzed by numerical simulation. The results show that: the prefabricated block pile caps has good seismic properties, the settlement of the prefabricated cap is consistent, and the settlement of the left and right halves is the same, while the displacement at the contact surface of the prefabricated cap and the column is large; the appropriate values of pile foundation diameter and

收稿日期: 2020-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678352)

作者简介: 孙振杰(1990-), 男, 工程师, 主要从事市政高速桥梁建设管理和加固维修工作。

E-mail: szjlyg@qq.com

pile cap reinforcement ratio have better mechanical performance at joints of caps.

Keywords: Prefabricated block caps; Rapid construction; Seismic resistance; Reinforcement ratio of pile caps

0 引言

近几年来,国家的政策倾向于建筑产业现代化,这有利于装配式结构的应用提速^[1]。城市高架在城市路网建设中占据了很大一部分,城市高架桥梁自下而上,逐渐形成预制拼装产业链,从桩基、桥台、立柱、盖梁、上部结构、防撞墙均实现预制装配化,但是桥梁承台仍然采用现浇结构,因此如何实现承台预制化成为当下研究的热点和难点。

预制拼装技术在城市高架桥梁主要实现在上部结构,对于下部结构的应用相对较少^[2]。尤其是关于桥梁预制承台连接方面研究较少,在不同类型桥梁以及不同环境因素的影响下,目前有一些学者在装配式桥墩的抗震性能进行了试验研究,Palermo 等^[3]介绍了控制结构地震反应的简单设计方法和建模方法,并对 5 个 1:3 的比例的桥墩试件的拟静力循环试验结果进行了报道和讨论。Wang 等^[4]指出现有的预制节段混凝土桥柱的滞回能耗不理想并且提出了新的高架桥立柱预制节段施工方法,以提高立柱的滞回能耗和侧向强度。研究表明在桥墩墩底处是最容易破坏的地方,所以在城市高架桥改造中对于桥墩承台的连接处是一个关键部位。姜海西^[2]指出承插式适用于桥墩与承台基础连接,它最大的特点在于施工精度要求相对较低,施工工序比较简单,现场作业量少。由于预制连接构造在地震中极具有脆弱性,并且研究了从传统的预制施工到预制连接构造在地震荷载作用下的影响。Canha 等^[5]采用两个均有光滑界面的试件,分析了具有光滑界面的承插式基础中预制柱基础的受力性能。

一些学者对于桩基和承台的连接的力学特性进行了研究,Barros^[6]和 Chan^[7]分别采用试验和数值模拟方法分析相同尺寸的预制空心现浇混凝土承台和整体浇筑承台的受力性能,得到了两个承台具有相近的力学特征的结论。对于动力荷载下承台力学特性,李国平^[8]按照 1/3 的缩尺比设计制作两个预制承台-桩连接构造试件和一个现浇承台-桩连接构造试件,进行往复加载试验与非线性数值分析。吴启和^[9]依托港珠澳大桥埋置式承台足尺模型工艺试验项目,采用理论计算分析与原位试

验监测相结合的方法对埋置式承台与桩的波流作用动力响应进行研究。王乾隆^[10]通过有限元软件 ABAQUS 模拟了墩柱在循环荷载作用下的变形,并将计算结果和试验进行对比。杨志坚^[11]基于试验的基础上,采用 OpenSees 对预应力混凝土管桩与承台连接节点进行了有限元分析。

目前关于桥梁的预制承台在地震作用下的受力变形研究较少,本文结合济阳路(卢浦大桥—闵行区界)快速化改建工程高架桥路段,采用 FLAC3D 软件对地震作用下高架分块预制承台进行分析,为以后提供工程经验。

1 工程概况

本次模拟主要针对济阳路(卢浦大桥—闵行区界)快速化改建工程 2 标项目。由于该项目地下作业部分涉及基坑开挖、围护、承台施工及回填,周期较长,管线影响比较大,基坑安全风险比较高,故考虑采用预制桥梁承台施工以期规避风险,实现城市快速化施工,这样可以极大的减少土方开挖和外运,减少环境污染,符合绿色环保工艺要求,而且可以减少对相邻管线的破坏和对周边建筑物、构筑物的影响。

此外,本次项目由于承台尺寸较大,重量较大,约 250 t,结合实际交通运输条件,按照高度<3 m,长度<30 m,宽度<4 m,重量<200 t 作为承台划分原则,将承台划分为 3 块,承台尺寸为 5.7×7.7 m²,高度 2.2 m,立柱尺寸 1.5×2 m²,立柱净距为 2 m,中分带宽度为 8m,尺寸详见下图,而且承台中采用了剪力键,防止界面处二者水平相互滑移和分离,增强了整体的稳定性,承台分块平面图、剖面图如图 1 和图 2 所示。承台分块之间采用企口连接,承台整体性采用预应力予以保障,暂拟定设置 3×2 道预应力孔道,预应力管道采用深锚方式。

2 计算模型建立与荷载形式的选择

为了研究预制的分块承台在地震作用下的受力及变形特性,同时分析承台配筋率及承台相对刚度等的影响,本文用 FLAC3D 数值分析软件建立了三维模型进行模拟分析。三维模型图如图 3

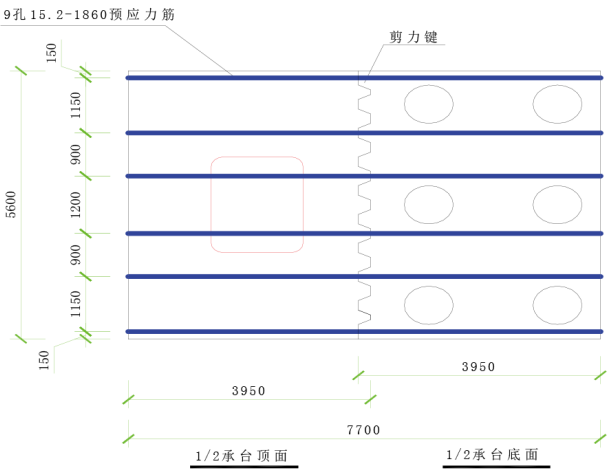


图 1 承台分块平面示意图
Fig.1 Schematic diagram of pile caps in block

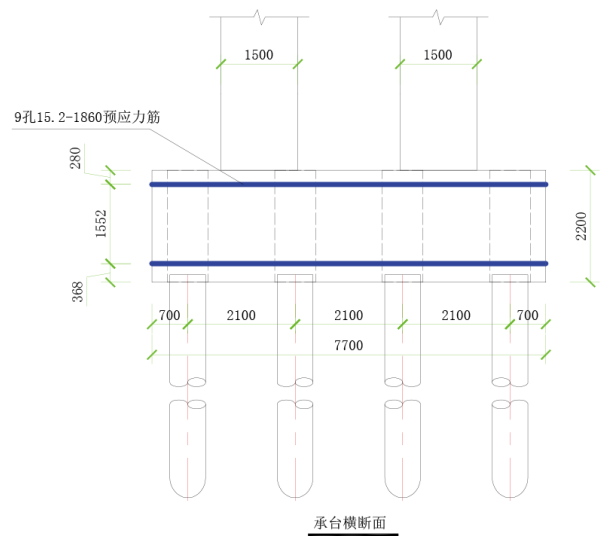


图 2 承台分块断面示意
Fig.2 Schematic diagram of pile caps in cross section

所示，带剪力键局部模型图如图 4 所示，由图可知，两个立柱位于两块拼装承台上面，下部为均布的桩基，桩基中心距为 2 m。在计算过程中软件定义的边界条件如下：四周固定，约束变形，地下施加地震荷载。模型设置的 x 方向长度为 20 m， y 方向长度为 20 m， z 方向长度为 50 m。

由于上海地区的抗震设防烈度Ⅶ度，根据建筑抗震设计相关规范中指出，地震烈度为Ⅶ度时，根据地震峰值加速度与烈度对照见表 1，地面运动峰值加速度在 $0.15\sim0.2\text{ m/g}^2$ 之间^[12]。以 El-Centro 波加速度时程作为地震荷载，加速度持续时间为 10 s，如图 5 所示。以局部阻尼作为三维动力模型的力学阻尼，表达式如下：

$$\beta_L=IIS \tag{1}$$

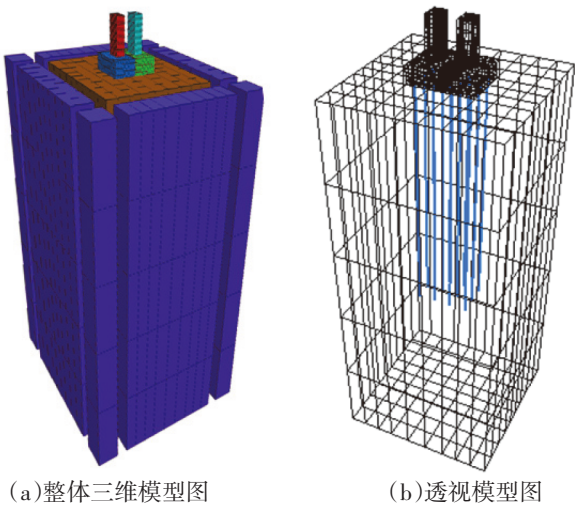


图 3 整体模型图
Fig.3 Overall model diagram

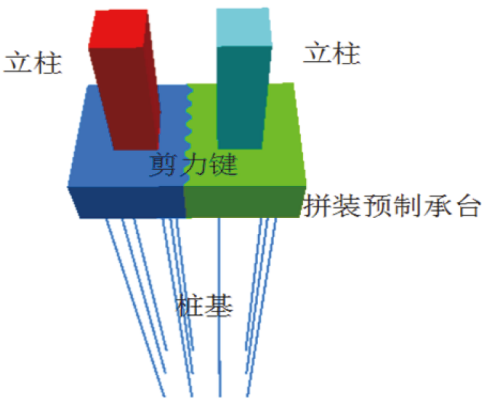


图 4 剪力键局部模型图
Fig.4 Partial model of shear key

式(1)中： β_L 和 S 分别表示局部阻尼系数和临界阻尼比。

表 1 地震峰值加速度与烈度对照

Table 1 Comparison of earthquake peak acceleration and intensity						
<0.05	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	≥0.4
<Ⅵ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅷ	≥Ⅸ

为了分析拼装界面的受力和位移情况，在计算的过程中需要设置一些监测点，由于分块承台是用剪力键进行连接的，还要检测桩顶的受力情况，因此监测点设置了 8 个，分别在预制承台中心轴处四个，承台最左端处监测点距离承台边侧面 0.7 m，距离下侧 1.1 m，4 个间距为 2.1 m。以及桩顶处 4 个，桩顶最左端处监测点距离左端 0.7 m，距离下侧 0.19 m，具体位置如图 6 所示。记录在地震作用下桩顶位置以及拼装界面的受力以及位移大小。

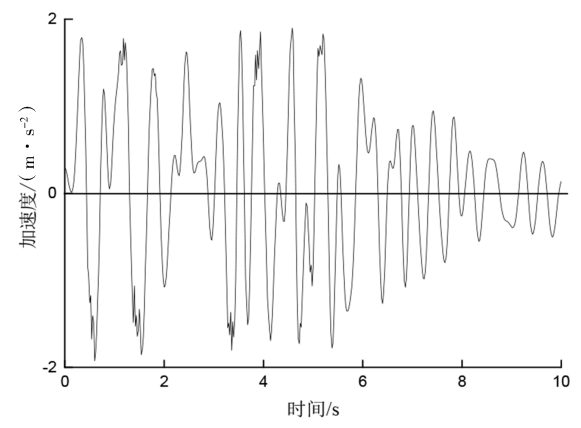


图 5 地震波加速度时程曲线
Fig.5 Acceleration time history curve of seismic wave

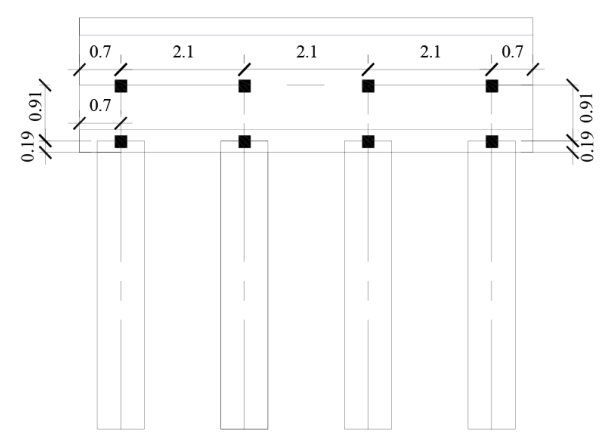


图 6 预制承台断面监测点布置图(单位:m)
Fig.6 Layout of monitoring points of precast cap section (unit: m)

3 模型参数选取

本文采用 $FLAC^{3D}$ 软件建模时对于立柱、桩基和预制承台选用弹塑性模型进行计算,钢筋本构关系采用线性强化弹塑性模型。所用混凝土均采用 C35 混凝土,模型的基本材料物理力学参数如表 1 所示;此外,地基土层从上到下分为:填土高度 5 m,粉质粘 10 m,淤泥质粉质粘土 15 m,粘质粉土 20 m,土层选用 Mohr-Coulomb 模型进行计算,土层模型的参数如表 3 所示。

4 结果分析

4.1 竖向位移

为了研究分块预制承台拼装结构在地震作用下的位移情况进行了数值模拟。由 $FLAC^{3D}$ 数值模

表 2 模型物理力学参数
Table 2 Parameters of test model

材料	弹性模量/ MPa	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	密度 ρ / ($kg \cdot m^{-3}$)
立柱	31	14.1	12.4	2221
桩体	33.4	16.3	15.2	2542
预制承台	31.2	13.2	13.5	2354

表 3 土层参数
Table 3 parameters of soils

材料名称	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(kg \cdot cm^{-3})$	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\psi/^{\circ}$
填土	16.20	0.18	1924	25	19.8
粉质粘土	15.43	0.37	1891	23	19.6
淤泥质粉质粘土	9.78	0.41	1785	13	16
粘质粉土	26.54	0.32	1872	7	30

拟下的竖向位移云图可知,在地震荷载作用下,四周约束,拼装预制承台发生竖向位移,可以清楚地看到拼装预制承台的整体性较好,预制拼接承台的沉降一致,左右两半沉降均相同,而在预制承台与立柱接触面位移较大,可得出在拼装预制结构时要合理设置承台的配筋率和桩基和承台的刚度来增加拼装结构整体的稳定性。

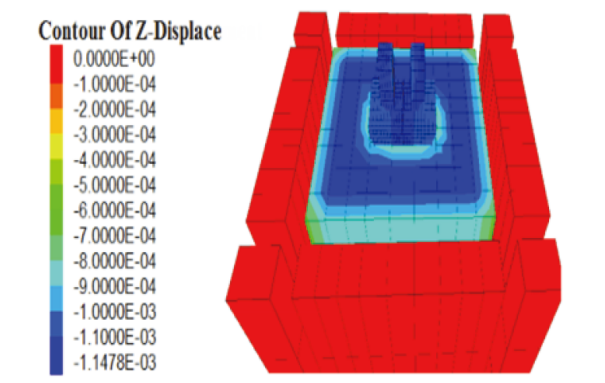


图 7 竖向位移云图
Fig.7 Cloud atlas of vertical displacement

4.2 承台相对刚度对桩顶轴力的影响

由于桩基和承台之间会出现由于刚度变化的不同而让桩基顶端承受力也不同,改变桩基承台的弹性模量来改变桩基和承台的刚度比。由图 8 可知,由于在地震作用下,随着承台相对刚度的

变大,当承台刚度相对值从0增加到2时,角桩轴力和边桩轴力增大,而当承台相对刚度值大于2后续保持平稳,当承台刚度相对值从0增加到2时,中桩轴力减小,而当承台相对刚度值大于2后续保持平稳,桩基受力整体呈现出了角桩>边桩>中桩的刚性承台桩顶受力分布规律,因此合理布置桩基的位置对于拼装结构稳定性很重要。

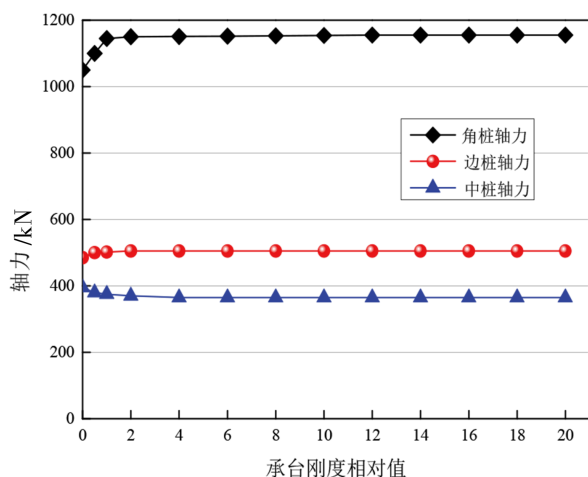


图8 桩顶轴力随承台相对刚度的变化规律

Fig.8 The variation law of the axial force of pile top with the relative stiffness of the pile cape

4.3 承台配筋率的影响

承台配筋率对预制承台拼接处有重要的影响,采用数值分析选取了2%、3%、4%和5%分别作为此次模拟中预制承台的配筋率。图9给出了承台配筋率对拼接处的受力和位移的影响。从图中可以看出,在相同水平位移下,随着承台配筋率增加,整体呈现出预制承台较大的承载力。预制拼装结构由预应力钢筋在承台内部张拉锚固连接成为一个整体,承台在地震荷载作用下产生水平侧移时,因节段受到预应力筋的牵拉,牵拉过程中预应力筋应力增大会增大节段内力从图8可以明显的看出,随着预制承台配筋率的增加,预制承台水平位移明显减小。而配筋率越高,混凝土截面延性会越小,综合考虑配筋率对预制结构截面延性的影响,3%的配筋率效果较好。

4.4 桩基直径的影响

为了研究桩基直径对预制拼装承台拼装处的受力和变形影响,采用数值模拟桩基直径为1 m、1.2 m、1.4 m和1.6 m作为预制承台下方桩径,由图10可知,随着桩基直径的增大,水平承载力越

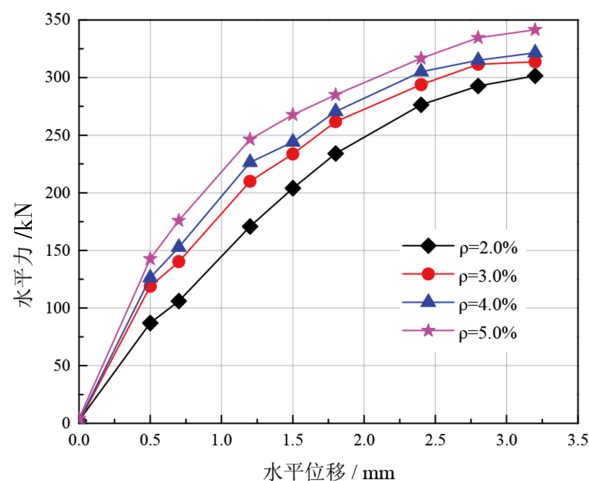


图9 承台配筋率对拼接处水平力和位移的影响

Fig.9 The influence of the reinforcement ratio of the cap on the horizontal force and displacement of the splice

大,预制承台拼接处的屈服位移越大。而随着桩基直径的增大,在地震作用下,桩基破坏状态的位移影响较大,承台延性减小,预制结构整体稳定性降低,可以解释为桩径越大,水平刚度越大,在产生水平位移情况下,水平反力越大。但也可以看出桩径有一个合适的范围,并非过小的桩径对预制承台拼装结构效果好,在预制承台实际工程应用时,采用较为合适的桩径。

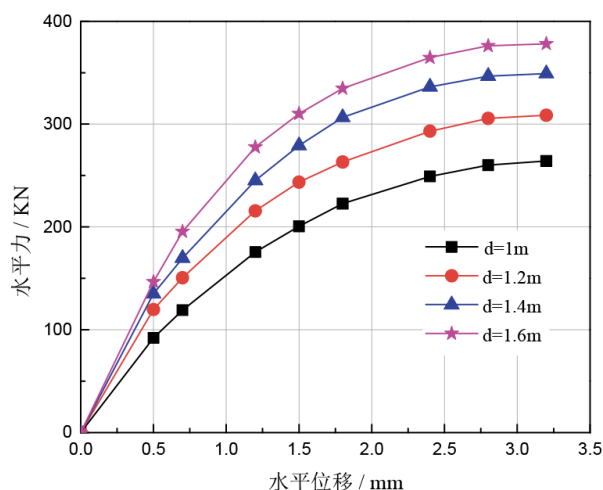


图10 桩基直径对拼接处水平力和位移的影响

Fig.10 Influence of pile diameter on horizontal force and displacement of joint

4 结论

(1)拼装预制承台的整体性较好,预制拼接承台的沉降一致,左右两半沉降均相同,而在预制承台与立柱接触面位移较大。

(2)桩基受力整体呈现出了角桩>边桩>中桩的刚性承台桩顶受力分布规律。

(3)3%承台配筋率对拼接处水平力和位移的影响效果较好,桩径并非越大和越小对承台拼接处受力性能越好,要选用合适桩径。

参考文献

- [1] 陈珊珊,刘继明,吴成龙,等. 装配式 SRC 柱-钢梁边节点抗震性能分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2019,38(6):536-543.
- [2] 姜海西,卫张震. 承插式预制拼装桥墩抗震性能研究综述[J]. 城市道桥与防洪,2017(12):56-59+10.
- [3] Palermo A, Pampanin S, Marriott D. Design, modeling, and experimental response of seismic resistant bridge piers with posttensioned dissipating connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2007,133(11):1648-1661.
- [4] Wang J C, Ou Y C, Chang K C, et al. Large - scale seismic tests of tall concrete bridge columns with precast segmental construction [J]. Earthquake engineering & structural dynamics,2008,37(12):1449-1465.
- [5] Canha R M F, Ebeling E B, Ana Lucia H. Analyzing the base of precast column in socket foundations with smooth interfaces [J]. Materials & Structures,2009,42(6):725-737.
- [6] Barros R, Maciel D N, Braz D H L. Numerical simulation of precast pile caps reinforced concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2017,872: 130-140.
- [7] Chan T K, Poh C K. Behaviour of precast reinforced concrete pile caps[J]. Construction and Building Materials,2000,14(2): 73-78.
- [8] 李国平,覃忠余,曹素功,等. 往复加载下预制承台-桩连接构造受力性能[J]. 土木工程学报,2021,54(01):106-115.
- [9] 吴启和,牛照,田唯,等. 港珠澳大桥埋置承台与桩波流作用动力响应分析与试验研究[J]. 中外公路,2014,34(01):121-124.
- [10] 王乾隆,杨斌. 浆锚连接集束配筋装配式柱抗震性能数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(3):66-71.
- [11] 杨志坚,韩嘉明,雷岳强,等. 预应力混凝土管桩与承台连接节点抗震性能研究[J]. 工程力学,2019,36(S1): 248-254.
- [12] 张鹏,王艺环,秦国晋. 非随机过程的地震激励下埋地压力管道的非概率可靠性分析[J]. 中国安全生产科学技术,2018,14(6):134-141.