

基于反应谱法的灌浆套筒连接装配式桥墩抗震性能研究

傅千龙¹, 刘泽², 吴芮¹, 潘有成¹, 任中俊²

¹浙江交工国际工程有限公司, 浙江 杭州

²湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

Email: csuzeliu@163.com

收稿日期: 2021年8月25日; 录用日期: 2021年9月20日; 发布日期: 2021年9月27日

摘要

公路桥梁需要高度关注桥墩的抗震性能。本文以某高速公路桥梁墩柱为例, 研究灌浆套筒连接装配式桥墩的抗震性能。建立了装配式桥梁墩柱的钢筋混凝土结构模型, 利用有限元模拟分析了墩柱的自振频率及响应特征, 基于反应谱法计算了该装配式桥墩在E1和E2地震作用下的受力与变形特征, 对比了装配式墩柱与现浇墩柱的地震响应。计算结果表明, 该装配式桥墩具有较好的抗震性能, 装配式墩柱与现浇墩柱的抗震性能基本相同。

关键词

装配式桥墩, 反应谱法, 抗震, 自振频率

Study on Seismic Performance of Assembled Pier with Grouted Sleeve Connection Based on Response Spectrum Method

Qianlong Fu¹, Ze Liu², Rui Wu¹, Youcheng Pan¹, Zhongjun Ren²

¹Zhejiang Jiaogong International Engineering Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Email: csuzeliu@163.com

Received: Aug. 25th, 2021; accepted: Sep. 20th, 2021; published: Sep. 27th, 2021

文章引用: 傅千龙, 刘泽, 吴芮, 潘有成, 任中俊. 基于反应谱法的灌浆套筒连接装配式桥墩抗震性能研究[J]. 土木工程, 2021, 10(9): 873-881. DOI: 10.12677/hjce.2021.109099

Abstract

Highway bridges need to pay close attention to the seismic performance of piers. Taking the pier column of an expressway bridge as an example, this paper studies the seismic performance of the assembled pier connected by grouting sleeve. The reinforced concrete structure model of the fabricated bridge pier is established. The natural vibration frequency and response characteristics of the pier are analyzed by finite element simulation. The stress and deformation characteristics of the fabricated pier under E1 and E2 earthquakes are calculated based on the response spectrum method, and the seismic responses of the fabricated pier and the cast-in-place pier are compared. The calculation results show that the fabricated pier has good seismic performance, and the seismic performance of fabricated pier column is basically the same as that of cast-in-place pier column.

Keywords

Fabricated Pier, Response Spectrum Method, Earthquake Resistance, Natural Frequency

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着交通需求的不断提高,我国的桥梁建设得到了空前大发展。装配式桥梁墩柱[1]具有施工简单、建设周期短、节能环保的优点,在桥梁建设中日益发挥着重要作用。装配式桥墩的立柱、盖梁、系梁采用预制构件,然后利用特定连接方法将承台与各预制件进行拼装,由于各部分为单独预制,需要高度关注其连接强度及抗震性能。

研究人员主要采用往复式的拟静力循环加载实验[2]以及数值模拟来研究墩柱的抗震性能。文献[3]开展了锚栓连接管柱的拟静力循环加载试验,研究了配筋形式对管柱能量耗散的影响特征;文献[4]开展了螺纹套筒机械连接立柱的拟静力循环加载试验,研究了纵筋连接形式和轴压比对试件承载能力和损伤的影响特征。文献[5]利用有限元模拟研究了循环荷载下承插式墩柱的承载能力和耗能特征,分析了墩柱嵌入深度、灌浆料强度对墩柱抗震性能的影响规律;文献[6]利用有限元模拟研究了循环荷载下浆锚连接墩柱的承载能力和耗能特征,分析了轴压比、搭接长度和搭接间距对其抗震性能的影响规律。

拟静力循环加载实验可以较好地描述墩柱的刚度退化和耗能特征,但是不能直接与抗震设防目标相联系起来,难以反映其实际抗震效果。而反应谱法[7]可以将结构受力与地震强度联系起来,因而研究人员也基于反应谱法来分析桥梁墩柱的抗震性能。比如,文献[8]利用反应谱法对某桥墩进行了抗震验算,文献[9]利用反应谱法分析了某桥梁立柱的内力分布规律。反应谱法通过计算结构在反应谱各阶频率下的力学响应,可以很方便地分析墩柱在地震荷载下的变形与受力特性。不足的是,当前的地震反应谱计算中一般将墩柱假设为梁模型,不能引入装配式墩柱在连接部位的几何形态。

本文以富阳至诸暨高速联络线十店线分离式立交桥下部墩柱为例,建立了装配式桥梁墩柱的钢筋混凝土结构模型,基于有限元模拟和反应谱法研究了灌浆套筒连接装配式桥梁墩柱的抗震性能,对比了现浇墩柱和灌浆套筒连接墩柱的受力及变形特征。

2. 装配式墩柱有限元模型

十店线分离立交桥位于富阳至诸暨高速联络线,该桥梁下部结构采用钻孔灌注桩和装配式墩柱(现浇承台、预制方形立柱、预制盖梁)。立柱与承台、盖梁之间采用灌浆套筒连接,承台顶面预留插筋,立柱的柱底布置钢套筒、柱顶预留插筋,盖梁内布置钢套筒。墩柱拼装时将承台外伸插筋伸入柱底套筒,并将柱顶外伸插筋伸入盖梁套筒,再将高强无收缩水泥浆灌入套筒。

本文基于十店线分离立交桥的设计图纸建立了墩柱有限元模型。墩柱模型由立柱、承台、盖梁三部分组成(如图 1(a)所示),其中立柱尺寸为 $1.3\text{ m} \times 1.3\text{ m} \times 10\text{ m}$,承台尺寸为 $2.5\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 2\text{ m}$,盖梁尺寸为 $1.7\text{ m} \times 1.7\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。各构件内部分别植入钢筋(含主筋、箍筋、拉筋、预应力筋)和钢套筒,钢筋骨架如图 1(b)所示。混凝土采用六面体单元和楔形单元,钢套筒采用六面体单元,立柱主筋采用梁单元,箍筋、拉筋和预应力筋采用杆单元。

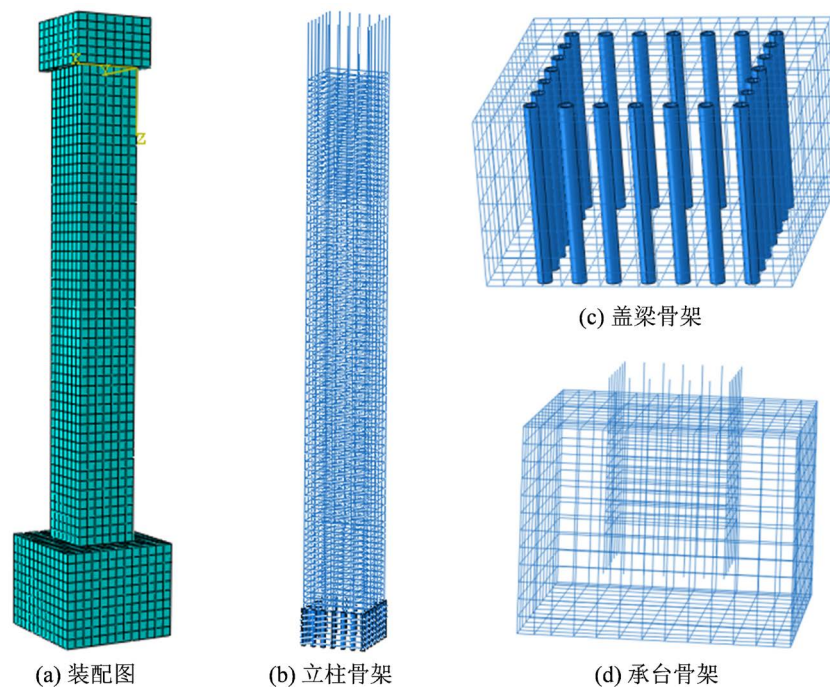


Figure 1. Finite element model of pier column

图 1. 墩柱有限元模型

有限元计算时,立柱与承台、盖梁采用硬接触算法,并取摩擦系数为 0.6。边界条件取为约束承台底面所有节点的三个位移分量,并在盖梁顶面施加集中质量(50T)作用上部作用。本文有限元计算中所采用的材料常数如表 1 所示。

Table 1. Material constants

表 1. 材料常数

材料	密度	弹性模量	泊松比
混凝土	2.45 T/m^3	32.5 GPa	0.25
钢筋、钢套筒	7.8 T/m^3	200 GPa	0.3
钢绞线	7.8 T/m^3	195 GPa	0.3

3. 墩柱自振频率及模态分析

反应谱分析需要利用结构的自振频率及模态响应,因而本文首先利用前述有限元模型和材料参数计算墩柱的自振频率及模态。有限元计算可得,该装配式墩柱的基频为 2.55 Hz,其前六阶自振频率如表 2 所示,前六阶自振模态如图 2 所示。

Table 2. Natural vibration frequency of fabricated pier column

表 2. 装配式墩柱自振频率

阶数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
频率	2.55	17.94	24.7	42.28	62.2	66.68
振型描述	弯曲	扭转	弯曲	拉伸	局部	反弯

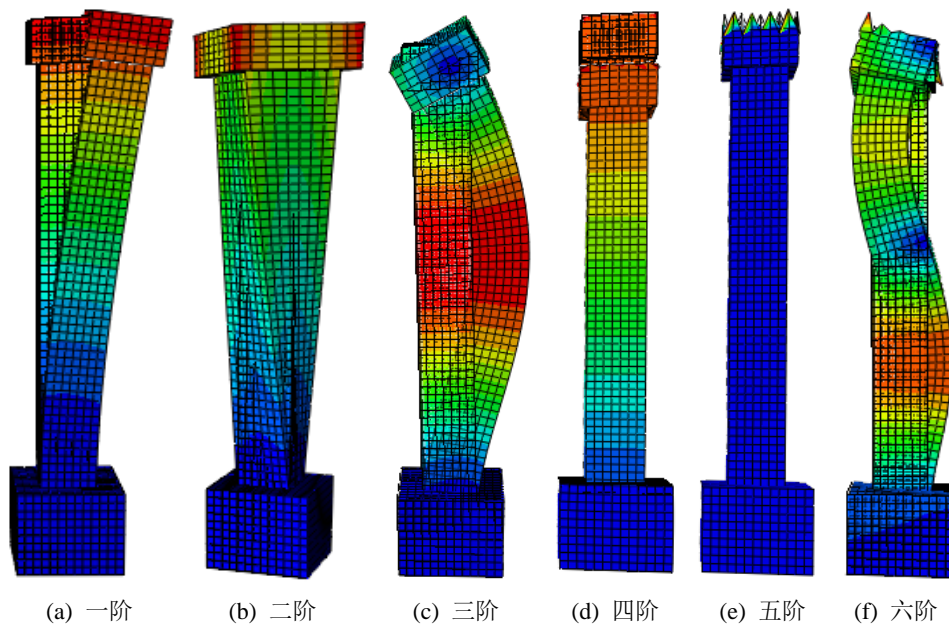


Figure 2. Natural vibration mode of fabricated pier column

图 2. 装配式墩柱自振模态

为了对比装配式墩柱与现浇墩柱的振动差异,本文也计算了现浇墩柱的自振频率及模态响应。现浇墩柱的几何尺寸、配筋情况及材料参数与前述装配式墩柱相同,二者之间的区别是现浇墩柱内部无钢套筒,立柱主筋为通长钢筋并伸入承台和盖梁,承台、立柱及盖梁的所有钢筋焊接为一个整体,所有混凝土合并为一个整体。

有限元计算可得,现浇墩柱的基频为 2.53 Hz,其前六阶自振频率如表 3 所示。对比表 2 和表 3 可知,装配式墩柱与现浇墩柱的自振频率并无明显差异,可见两种墩柱具有非常相似的振动特征。

Table 3. Natural vibration frequency of cast-in-situ pier column

表 3. 现浇墩柱自振频率

阶数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
频率	2.53	18.52	24.69	42.13	53.59	68.1
振型描述	弯曲	扭转	弯曲	拉伸	局部	反弯

4. 墩柱地震响应及抗震分析

4.1. 设计地震反应谱

根据《公路工程抗震规范》[10], 桥梁墩柱的水平设计加速度反应谱值 S 按照如下公式计算

$$S = \begin{cases} S_{\max} (5.5T + 0.45) & (T < 0.1 \text{ s}) \\ S_{\max} & (0.1 \text{ s} \leq T \leq T_g) \\ S_{\max} (T_g/T) & (T > T_g) \end{cases} \quad (1)$$

其中 S_{\max} 为水平设计加速度反应谱最大值, T_g 为特征周期, T 为结构自振周期。式(1)中 S_{\max} 定义为

$$S_{\max} = 2.25C_i C_s C_d A_h \quad (2)$$

其中 A_h 为设计基本地震动峰值加速度, C_i 为抗震重要性修正系数, C_s 为场地系数, C_d 为阻尼调整系数。

该工程所在地区的抗震基本烈度为 6 度, 抗震设防类别为 B 类, 水平设计加速度反应谱的相关参数如表 4 所示, 该墩柱在 E1 地震和 E2 地震下的水平设计加速度反应谱如图 3 所示。

Table 4. Horizontal design acceleration response spectrum coefficient

表 4. 水平设计加速度反应谱系数

A_h	T_g	C_i	C_s	C_d	阻尼比 ζ
0.05g	0.35s	0.5 (1.7)	1.2	1	0.05

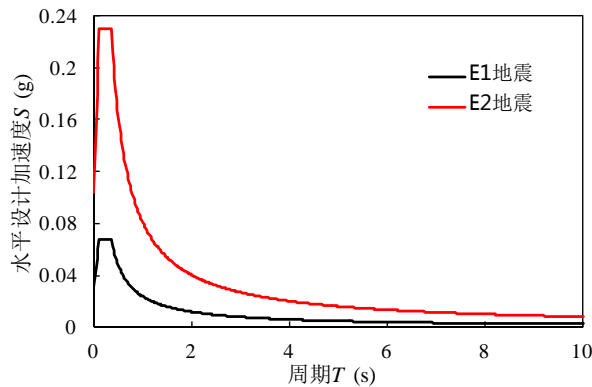


Figure 3. Acceleration response spectrum curves of E1 and E2 earthquakes

图 3. E1、E2 地震加速度反应谱曲线

竖向设计加速度反应谱由水平向设计加速度反应谱乘以竖向/水平向谱比函数 R , R 由式(3)给出

$$R = \begin{cases} 1 & (T < 0.1 \text{ s}) \\ 1 - 2.5(T - 0.1) & (0.1 \text{ s} \leq T < 0.3 \text{ s}) \\ 0.5 & (T \geq 0.3 \text{ s}) \end{cases} \quad (3)$$

4.2. 地震反应谱响应与抗震分析

本文同时考虑顺桥向、横桥向以及竖向的地震作用, 总的设计最大地震作用效应按式(4)进行计算。

$$E_i = \sqrt{E_{ix}^2 + E_{iy}^2 + E_{iz}^2} \quad (4)$$

式中, E_{ix} 、 E_{iy} 、 E_{iz} 分别为三个方向的地震作用所产生的最大效应。

图 4 为该装配式墩柱在上述地震反应谱作用下的混凝土最大主应力分布云图, 图中(a)、(b)分别为 E1 地震、E2 地震的计算结果。由图 4(a)可知, E1 地震作用下混凝土的最大主应力为 1.6 MPa, 远低于 C40 混凝土的抗拉强度, 因此该装配式墩柱在 E1 地震下不会发生破坏。由图 4(b)可知, E2 地震作用下混凝土的最大主应力为 5.34 MPa, 立柱下部转角部位混凝土的最大主应力已经超过其抗拉强度, 该处会发生局部破坏, 但是墩柱绝大部分区域的最大主应力仍处于安全范围, 说明该装配式墩柱在 E2 地震下不会发生倒塌或严重结构损伤, 经修复后仍可正常使用。

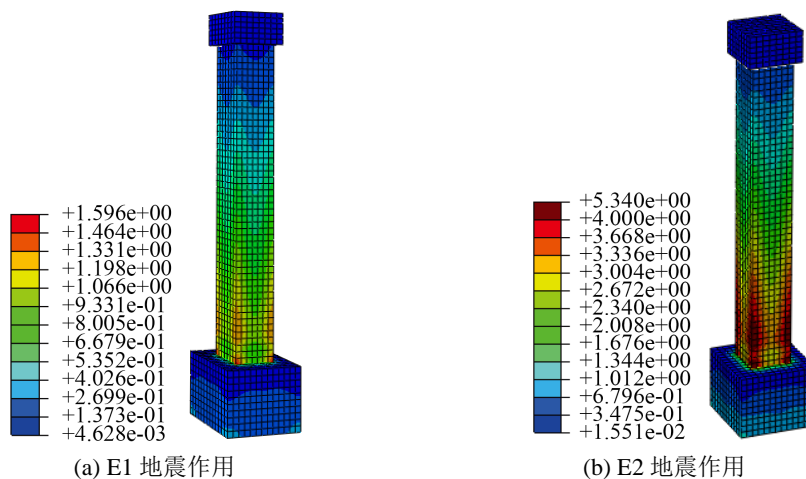


Figure 4. Maximum principal stress distribution of fabricated pier column (concrete)

图 4. 装配式墩柱(混凝土)的最大主应力分布

图 5 为该装配式墩柱在上述地震反应谱作用下的位移分布云图, 图中(a)、(b)分别为 E1 地震、E2 地震的计算结果。由图 5 可知, 墩柱在 E1 地震作用下的最大位移仅为 3.65 mm, 该数值远小于墩柱屈服所对应的位移值; 墩柱在 E2 地震作用下的最大位移为 12.2 mm, 该数值远小于墩柱倒塌所对应的位移值。

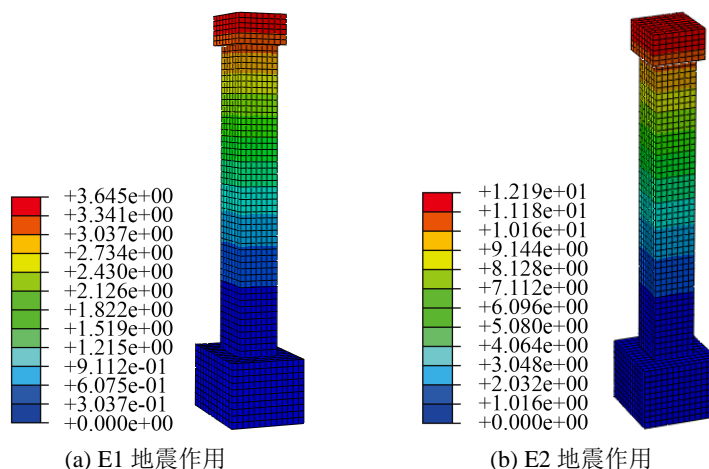


Figure 5. Displacement distribution of fabricated pier column

图 5. 装配式墩柱的位移分布

图 6 给出了现浇墩柱在 E2 地震下的应力和位移分布, 对比图 4、图 5 和图 6 可知, 现浇墩柱和装配式墩柱的最大位移基本相同, 其应力分布也非常接近, 说明二者的抗震性能并无明显差异。

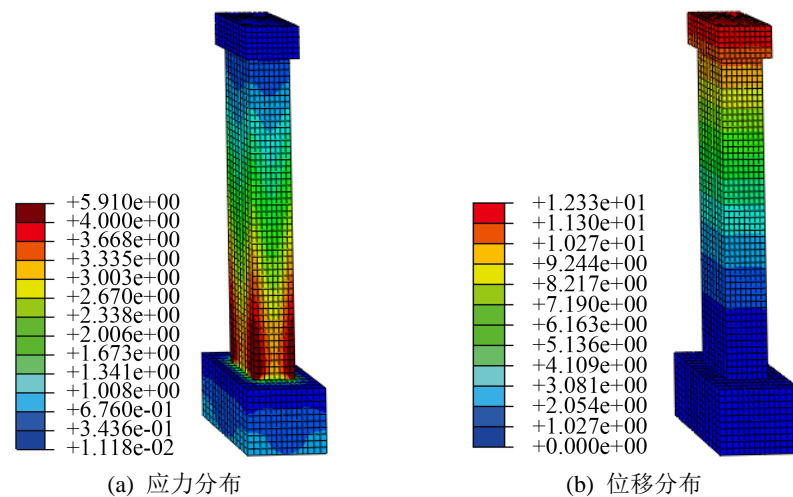


Figure 6. Stress and displacement of cast-in-situ pier column under E2 earthquake
图 6. E2 地震下现浇墩柱的应力和位移

为了验证反应谱分析结果的合理性, 本文将立柱简化为悬臂梁模型, 并对理论计算结果和反应谱分析结果进行了对比。

设柱顶受横向力 F 作用(图 7 所示), 柱顶的横向位移为

$$y = \frac{FL^3}{3EI} \quad (5)$$

上式中 L 为立柱的高度, EI 为立柱横截面的抗弯刚度。

立柱横截面可看作是由混凝土与钢筋所组成的复合截面(如图 8 所示), 可采用相当截面法计算横截面的抗弯刚度, 即将该复合截面等效为混凝土截面。

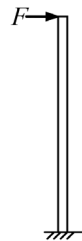


Figure 7. Simplified model of column
图 7. 立柱简化模型

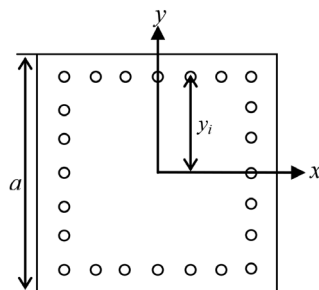


Figure 8. Cross section of column
图 8. 立柱横截面

于是, E 取为混凝土的弹性模量, I 需进行等效计算, 并有

$$I = I_1 + I_2 \quad (6)$$

式(6)中 I_1 、 I_2 分别为混凝土和钢筋所对应的惯性矩。设墩柱的边长为 a , 易得

$$I_1 = \frac{a^4}{12} \quad (7)$$

设钢筋的直径为 d , 第 i 根钢筋到 x 轴(中性轴)的距离为 y_i , 可以得到

$$I_2 = \frac{E_s - E_c}{E_c} \sum_{i=1}^N \pi d^2 \cdot y_i^2 \quad (8)$$

上式中 E_c 、 E_s 分别为混凝土与钢筋的弹性模量, N 为主筋数量。

取 $a = 1.3 \text{ m}$ 、 $d = 32 \text{ mm}$ 、 $L = 10 \text{ m}$, 由式(6~8)可以算出 $I = 0.2573 \text{ m}^4$ 。再将柱顶位移 y 取为反应谱分析得到的数值(E2 地震下为 12.2 mm), 由式(6)可以计算出横向力 $F = 306 \text{ kN}$ 。因此, 若从立柱变形来考虑, E2 地震反应谱作用与柱顶横向荷载($F = 306 \text{ kN}$)相当。

仍采用图 7 的简化模型, 还可以得出柱底横截面边缘的最大应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{FL}{I} \cdot \frac{a}{2} \quad (9)$$

由于柱底材料包括钢套筒, 因而式(9)中 I 还应计入钢套筒的惯性矩 I_3 。可以得出

$$I_3 = \frac{E_s - E_c}{E_c} \sum_{i=1}^N \pi (d_1 - d_2) \delta \cdot y_i^2 \quad (10)$$

上式中 d_1 、 d_2 分别为钢套筒的外径和内径, 为钢套筒的壁厚。取 $d_1 = 77 \text{ mm}$ 、 $d_2 = 55 \text{ mm}$, 可以计算出 $I_3 = 0.1096 \text{ m}^4$ 。再由式(9)可得柱底横截面的最大应力 $\sigma_{\max} = 5.72 \text{ MPa}$, 该数值与 E2 地震反应谱分析的结果相接近(5.34 MPa)。

5. 结论

本文利用有限元模拟分析了灌浆套筒连接装配式墩柱的自振响应, 并基于反应谱法分析了该装配式墩柱的抗震性能, 得到了如下结论:

1) 在 E1 地震反应谱作用下, 墩柱的最大位移远小于墩柱屈服所对应的位移值, 混凝土的最大主应力远小于抗拉强度, 说明该装配式墩柱在 E1 地震下不会发生破坏。

2) 在 E2 地震反应谱作用下, 立柱下部转角部位混凝土会发生局部破坏, 但是墩柱绝大部分区域的最大主应力仍处于安全范围, 说明该装配式墩柱在 E2 地震下不会发生倒塌或严重结构损伤, 经修复后仍可正常使用。

3) 现浇墩柱和装配式墩柱的自振响应非常相似, 二者在地震反应谱作用下的最大位移基本相同, 其应力分布也非常接近, 说明现浇墩柱和装配式墩柱的抗震性能并无明显差异。

参考文献

- [1] 石剑. 装配式桥梁墩柱预制施工关键技术研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2020(4): 34-38.
- [2] 姜海西, 王志强, 沈佳伟. 灌浆金属波纹管连接预制拼装立柱抗震性能试验研究[J]. 结构工程师, 2016, 32(5): 132-138.
- [3] 张锡治, 马健, 蔡巍巍, 等. 变预应力度装配式管柱抗震性能试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(10): 1041-1048.

-
- [4] 刘阳, 郭子雄, 吕英婷. 采用改进纵筋连接的足尺装配式钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(11): 101-110.
- [5] 韩艳, 董嘉雯, 王龙龙, 等. 承插式装配桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(5): 63-70.
- [6] 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): 66-70.
- [7] 赵密, 李苗, 咎子卉, 等. 地下结构抗震分析反应谱法与现有简化方法对比[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 783-790.
- [8] 栾旭光. 基于 MIDAS 桥梁墩柱抗震验算分析[J]. 城市道桥与防洪, 2020(6): 76-78.
- [9] 杨耿焱. 装配式钢筋混凝土拱桥立柱节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [10] 中华人民共和国行业标准. 公路工程抗震规范: JTG B02-2013 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.