

外置钢板对套筒连接装配式桥墩抗震性能影响的试验研究

梁东伟¹, 王超凡^{2*}

¹中冶京诚工程技术有限公司, 北京

²东北林业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2022年6月5日; 录用日期: 2022年6月15日; 发布日期: 2022年6月27日

摘要

为了提高灌浆套筒置于承台基础中装配式桥墩的抗震性能, 采用外置钢板对其加固, 并制作未加外置钢板的装配式桥墩和现浇桥墩作对比, 开展振动台试验。对三种桥墩的动力特性, 加速度和位移响应进行测试并分析。结果表明: 各个桥墩均为受弯破坏。三种桥墩加速度和位移响应虽有一定差异但表现形式相似。加载结束时, 外置钢板桥墩的自振频率最大, 刚度最大, 损伤最小。外置钢板加强了装配式桥墩核心混凝土约束, 使得整体抗震性能有所提高, 是一种有效提升装配式桥墩抗震性能的方式。

关键词

振动台试验, 外置钢板, 灌浆套筒, 装配式桥墩, 抗震性能

Experimental Study on the Influence of External Steel Plates on the Seismic Performance of Sleeve-Connected Fabricated Bridge Piers

Dongwei Liang¹, Chaofan Wang^{2*}

¹MCC Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing

²College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: Jun. 5th, 2022; accepted: Jun. 15th, 2022; published: Jun. 27th, 2022

Abstract

To improve the seismic performance of fabricated piers with grouted sleeves placed in the foundation.
*通讯作者。

文章引用: 梁东伟, 王超凡. 外置钢板对套筒连接装配式桥墩抗震性能影响的试验研究[J]. 土木工程, 2022, 11(6): 788-796. DOI: 10.12677/hjce.2022.116085

dation of the bearing, external steel plates were used to reinforce them and shaking table tests were carried out to compare fabricated piers without external steel plates with cast-in-place piers. The dynamic characteristics, acceleration and displacement responses of the three piers were tested and analysed. The results show that all piers are subject to bending damage. The acceleration and displacement responses of the three piers were different but similar in form. At the end of the loading, the external steel plate pier has the highest self-vibration frequency, the highest stiffness and the least damage. The external steel plates strengthen the core concrete restraint of the fabricated piers and improve the overall seismic performance, which is an effective way to improve the seismic performance of the fabricated piers.

Keywords

Shaking Table Tests, External Steel Plates, Grouted Sleeves, Fabricated Piers, Seismic Performance

Copyright © 2022 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

桥墩在桥梁结构中作为传递上部结构受力的关键构件, 在地震作用下的抗震性能要求较高。而目前普通的钢筋混凝土桥墩在地震后往往发生较大的残余变形, 导致修复困难或直接失去服役价值[1]。设计和制作合理的装配式桥墩具有良好的延性和自复位能力, 进而提高了桥墩自身的耗能能力与抗震性能[2][3]。

对于装配式桥墩基础来说, 其主要的拼装方式有很多, 按照预制构件连接方式来分, 包括预应力节段拼装、预制波纹管连接、预制灌浆套筒连接和法兰盘连接等; 按照结构来分, 分为单节段、多节段拼装和承插式连接等[4]。由于灌浆套筒目前已有标准化尺寸, 并且预制部件拼装已有成熟的施工方法, 因此得到实际工程的广泛应用[5]。

灌浆套筒作为连接墩身和基础的重要构件, 其放置位置既可以在墩柱内又可以在承台基础中[6]。其中置于承台基础中的装配式桥墩, 其墩身破坏形式与传统混凝土桥墩大同小异[7][8]。本文为了进一步提高置于承台基础中装配式桥墩的抗震性能, 采取外置钢板的方法并开展了相应的振动台试验[9][10]。

2. 试验简介

2.1. 装配式桥墩的相似设计

本文设计制作了3个桥墩模型试件, 分别为套筒置于承台基础的装配式试件(SPC), 外置钢板的装配式试件(ESP)和现浇对比试件(CIP)。根据一致相似率[11], 对桥墩模型进行1:4相似设计, 对几何特性、材料特性、荷载和动力特性分别进行一致相似律的转换, 其中根据时间相似比和加速度相似比, 将地震波的持续时间分别压缩为原波长的0.175倍, 加速度相似比为1.955。

在一致相似率中, 长度和面积作为最基本的缩尺比参数, 其尺寸效应直接影响了试件的抗震性能; 由于振动台加载能力有限, 进一步对弹性模量进行缩尺设计, 以满足加载工况的需求。随着尺寸参数和弹性模量的改变, 质量和刚度也随之变化。时间, 速度和加速度等动力参数, 对地震动的选取和地震时程的激励而言至关重要。由此根据上述需求, 一致相似率见表1所示。

Table 1. Consistent similarity rate
表 1. 一致相似率

物理量	相似关系	相似比
长度	l_s	0.25
面积	$S_s = l_s^2$	0.0625
弹性模量	E_s	0.689
等效密度	$\bar{\rho}_s = \frac{m_c + m_d + m_{cm}}{l_s^3 (m_b + m_{ob})}$	1.409
泊松比	μ_s	1
质量	$m_s = \bar{\rho}_s l_s^3$	0.022
刚度	$K_s = E_s l_s$	0.172
时间	$t_s = l_s (\bar{\rho}_s / E_s)^{0.5}$	0.358
速度	$v_s = (E_s / \bar{\rho}_s)^{0.5}$	0.699
加速度	$a_s = E_s / l_s \bar{\rho}_s$	1.955
阻尼	$c_s = m_s / t_s$	0.062
频率	$\omega_s = (E_s / \rho_s)^{0.5} / l_s$	2.797

2.2. 模型尺寸构造

根据相似理论量纲分析, 模型截面的应力、钢筋的强度和混凝土的强度的相似常数应当一致。但是, 就目前而言, 无法找到同时满足具有相同相似常数的钢筋和混凝土材料。因此需要从构件的截面应力角度出发, 从正截面和斜截面承载力上考虑模型的相似[12]。

针对正截面而言, 需要保证正截面承载能力相似, 也即抗弯能力等效的原则; 同样的, 接斜截面而言, 需按照抗剪能力等效的原则保证斜截面承载能力相似。因此模型的主要构造根据抗弯抗剪等效原则设计。其中墩身高度为 1.425 m, 墩身直径为 0.25 m, 承台尺寸为 0.85 m × 0.85 m × 0.5 m, 主筋配筋率为 1.88%, 箍筋配筋面积为 28.3 mm², 采用螺旋箍筋配置, 箍筋间距为 100 mm。在墩顶设置 0.4 t 的人工质量。灌浆套筒长度为 280 mm, 内径 30 mm, 外径 38 mm。外置钢板高度为 400 mm, 厚度为 2 mm。具体构造见图 1 所示。

2.3. 材料性能

考虑到振动台幅值有限, 采取外掺粉煤灰来降低混凝土弹性模量的方法进行材料设计。其中墩身采用 C25 混凝土, 承台采用 C30 商品混凝土, 具体的材料性能见表 2 所示。

主筋采用 φ14 的 HRB400 钢筋, 屈服强度为 455 MPa, 极限强度为 638.8 MPa。砂浆垫层和灌浆料分别采用 C60 和 C80 的高强无收缩水泥砂浆。灌浆套筒采用 45 号钢, 外置钢板采用 Q235 号钢。

2.4. 地震波和荷载工况

本次振动台试验选用 Elcentro 波、Taft21°和 Taft111°(见图 2 所示)三条地震波作为地震模拟振动台输入的台面激励, 地震波为 X、Y 双向加载。其中 El-centro 波的持续时间为 19.13 s, 时间步长为 0.00716 s, 地震卓越频率为 4.08 Hz; Taft21°波的持续时间为 19.454 s, 时间步长为 0.00358 s, 卓越频率为 3.80 Hz; Taft111°波的持续时间为 19.461 s, 时间步长为 0.00358 s, 地震卓越频率为 8.374 Hz。

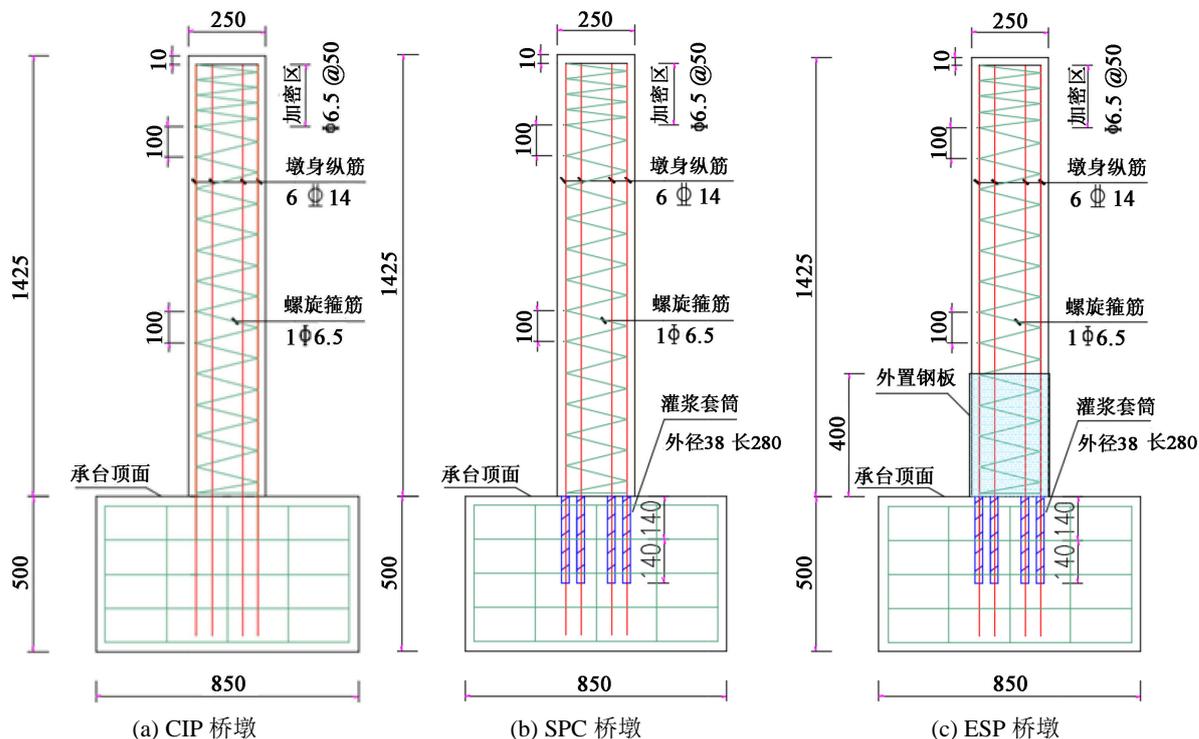


Figure 1. Bridge pier model construction
图 1. 桥墩模型构造图

Table 2. System resulting data of standard experiment
表 2. 标准试验系统结果数据

混凝土强度等级	抗压强度(MPa)	弹性模量(N/mm ²)
C25	21.49	2.24
C30	28.01	3.08

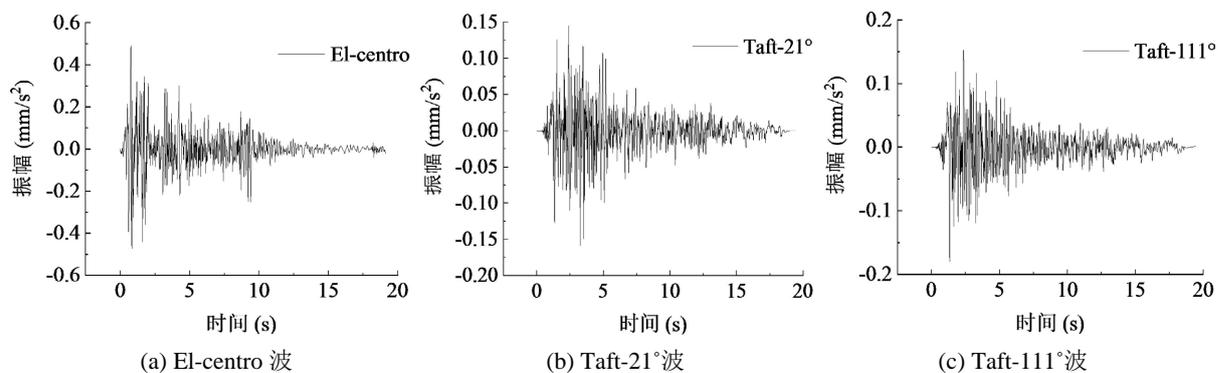


Figure 2. Selection of seismic waves
图 2. 地震波的选取

试验工况采用规范与实际自定义相结合的方式来选择, 共分为 41 个工况, 试验在每级工况的加载前后, 均采用峰值为 0.05 g 的白噪声对桥墩模型进行扫描, 试验加载至墩台破坏或者振动台激励上限(0.9 g)

时停止加载, 本次试验设定的振动台振动方向为双向, 即 X 向和 Y 向同时激励; 对于本次双向地震动激励输入, 不同方向间的输入峰值加速度关系宜满足规范要求, 即 1 (水平 X): 0.85 (水平 Y)。

3. 振动台试验结果分析

3.1. 试验现象

通过试验可以表明, 2 种装配式桥墩和现浇桥墩在试验过程中均出现不同程度的损伤和破坏。见图 3 所示。当 PGA (地面峰值加速度) 加载至 9 度多遇即第 14 个工况时, CIP 桥墩开始出现裂缝, 而对于装配式桥墩, 均在 PGA 加载至 7 度基本即第 11 个工况前后出现裂缝, 裂缝出现的位置大多在与 X 向夹角在 15° 到 20° 处, 且随着 PGA 的不断增大, 裂缝个数和裂缝宽度均会增加, 其发展趋势大多为沿墩身横向发展, 少部分斜向发展。

由图 3 可以得出, 对于 CIP 桥墩来说, 距墩底 130 mm 处的一条横向裂缝在 8 度罕遇的情况下已经沿墩柱横截面贯通, 其裂缝宽度达 0.25 mm。到试验结束时, 先后出现了 4 条贯通裂缝, 分别为距墩底 130 mm, 210 mm、360 mm 和 510 mm 处, 对于 SPC 墩柱而言, 在距墩底 140 mm 处的一条裂缝在第 39 工况下即 PGA 峰值为 0.9 g 下出现横向贯通裂缝, 裂缝宽度为 0.1 mm。到试验结束, 先后出现了 2 条贯通裂缝, 分别是距墩底 100 mm 和 130 mm 处; 对于 ESP 桥墩而言, 外置钢板和粘钢胶对墩柱的紧箍作用, 在试验开始之前出现了少量的竖向细微裂缝, 外置钢板承台承插式墩柱并未出现贯通裂缝。



Figure 3. Bridge pier damage forms
图 3. 桥墩破坏形式图

3.2. 动力特性

通过白噪声激励下的墩顶加速度时程, 对加速度数据进行傅里叶变换, 可以得到时程下的频率, 由于承台利用高强螺栓固定在振动台台面上, 配重箱利用螺栓锚固在桥墩上, 因此, 可假定各个桥墩属于单自由度体系构件, 对于单自由度体系来说, 结构的固有频率和结构刚度有如下关系。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (2)$$

其中: ω_n 为固有振动圆频率, k 为结构刚度, m 为质量, f_n 为固有振动频率。

根据 Matlab 软件对采集的振动信号进行处理, 利用 NExT-ITD 法对模型频率和阻尼进行求解[13], 在求解的过程中, 由于刚度很大, 且为中矮墩, 桥墩的回复力和阻尼耗能较少, 加上上部配重较低, 导致模型的阻尼过小, 从加载前到加载结束后阻尼比一直保持在 1% 左右, 因此可以认定此种模型在震动的作用下为无阻尼的自由振动。因此本文中对于阻尼变化不再分析。

由白噪声扫描桥墩固有振动频率见表 3, 其变化率为加载结束时的固有振动频率 $f_{\text{终}}$ 和初始固有振动频率 f_0 的差值的绝对值与初始固有频率的比值。

$$\Delta = \frac{|f_{\text{终}} - f_0|}{f_0} \quad (3)$$

Table 3. White noise scanning of pier inherent frequencies

表 3. 白噪声扫描桥墩固有频率

墩柱模型 工况	CIP 桥墩	SPC 桥墩	ESP 桥墩
预加载	9.515	12.611	13.437
初始	9.599	12.604	13.863
0.068 g	9.538	12.857	13.221
0.137 g	9.037	12.334	12.334
0.196 g	8.809	11.954	13.985
0.274 g	8.448	11.343	11.791
0.391 g	8.821	11.368	12.911
0.431 g	8.009	11.646	12.085
0.55 g	7.954	10.958	10.943
0.65 g	7.472	10.028	11.384
0.783 g	7.271	9.513	10.782
0.9 g	6.896	8.96	10.220
变化率	28.16%	28.91%	26.28%

由表 3 可以看出, 各个墩柱在 PGA 不断施加的过程中固有振动频率均有不同程度的下降, 这说明随着地震烈度的增加, 各个墩柱表面出现大量裂缝, 导致墩柱的刚度有所下降; 从初始扫频结果来看, 装 SPC 桥墩和 ESP 桥墩的刚度较大, CIP 桥墩的差别很小。而到了加载结束, SPC 桥墩的固有频率下降的比 ESP 桥墩的大, 这说明外置钢板提高了墩柱的抗震性能。加载至 0.9 g 时, CIP 桥墩的固有频率最小, 即使 SPC 桥墩的固有频率下降最快, 但频率值大小始终大于 CIP, 说明两种装配式桥墩的刚度在同种地震荷载条件下要比 CIP 桥墩的大。

3.3. 加速度分析

加速度时程可以直观反映出各个墩柱在地震力作用下的摇摆响应, 结合上述固有振动频率的变化, 全面论述各个墩柱的抗震性能。对加载最后一组工况下, 即 0.9 g 时墩顶加速度时程进行分析, 见图 4 所示。

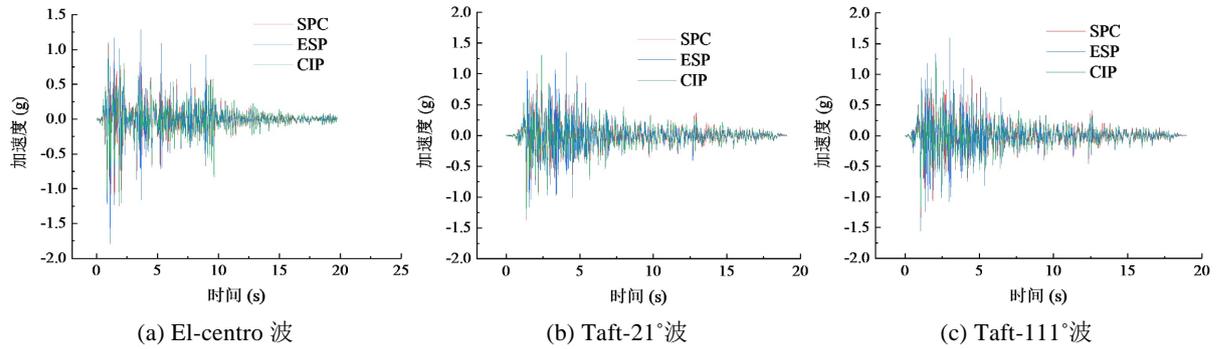


Figure 4. Time course of acceleration at the top of the pier

图 4. 墩顶加速度时程

在各个工况下 ESP 的墩顶加速度响应最为剧烈, CIP 相比来说更轻微, 说明 ESP 的刚度更大, 随着地震力作用的摇摆程度更大, 而 CIP 的响应较小, 说明在地震力下产生的裂缝更多, 导致试件无法更好的传力, 装配式桥墩的加速度时程仅次于外置钢包桥墩且明显比 CIP 的大, 说明装配式桥墩的刚度变化在地震力作用下影响较小; 对于三种波而言, 在 Taft111°波的激励下三种模型的地震响应更大, 这是由于 Taft111°波的卓越频率与桥墩的固有自振频率接近, 导致模型响应更为剧烈。

墩底峰值加速度包括峰值最大值和最小值, 这里表述的最大值和最小值分别表示两个相对的两个方向, 本身不具可比性, 但其绝对值大小具有可比性, 本文对地震波激励过程中墩顶峰值加速度进行分析, 见图 5 所示。

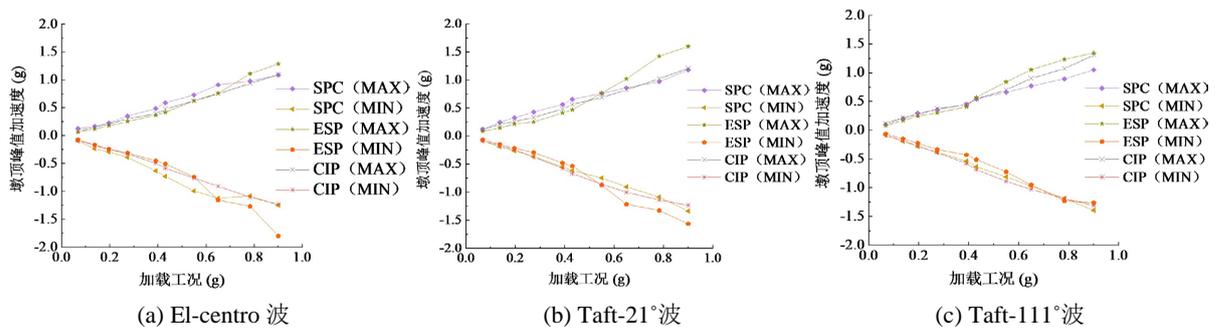


Figure 5. Peak value acceleration of the pier top

图 5. 墩顶峰值加速度

由图 5 可以看出, 在地震波激励开始到 0.431 g 时, 3 种桥墩的峰值加速度大致重合, 从 0.431 g 开始各个图的峰值加速度开始发散, 这说明在 0.431 g 的地震激励下, 各个桥墩开始出现不同程度的裂缝和损伤; ESP 桥墩的峰值加速度相较几种桥墩而言是最大的, 这可说明 ESP 在地震激励时所受损伤较小, 传力性较好, 这与我们上述裂缝记录结果和白噪声扫频结果是一致的; 由图中趋势仍能明显看出 El-Centro 波的发散程度最小, Taft111°波发散程度较大, 说明 Taft111°波影响程度比 El-Centro 波更大, 这直接说明了地震动的卓越频率对于桥墩抗震而言至关重要。

3.4. 位移分析

墩顶位移对单自由度体系桥墩而言可以表现出结构在地震力作用下墩身的柔度和变形趋势, 对于桥墩安全性来说至关重要, 是桥墩变形能力的直观体现。下面对卓越频率与自振频率相似的 Taft111 波进行分析。

对三种桥墩的墩顶位移时程进行分析, 见图 6 所示。

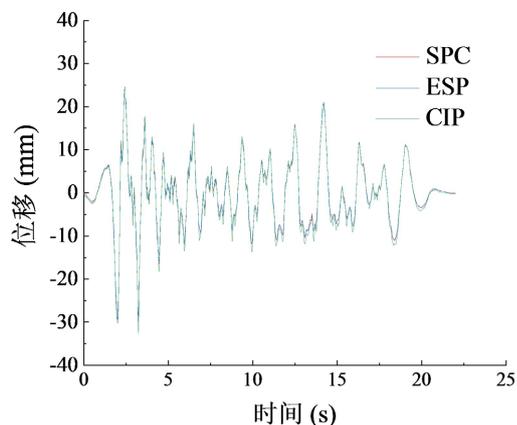


Figure 6. Time course of pier top displacement under Taft 111° waves

图 6. Taft111°波下墩顶位移时程

由图 6 可知, CIP 桥墩的墩顶位移时程总是最大的, 说明 CIP 桥墩的延性更大, 而 ESP 桥墩的峰值始终是最小的, 这说明 ESP 桥墩的变形更小, 刚度更大。三种桥墩的位移时程趋势相同, 说明这三种桥墩在地震激励下的表现形式相似, 具有类似的受力行为。

综合加速度时程和位移时程可以得出, CIP 模型的刚度最小, 抗震性能最弱, SPC 模型其次, ESP 模型刚度最大, 抗震性能最好。但在高烈度下, 其抗震性能的好坏差距不明显, 因此在工程中可采用装配式桥墩作为支撑结构。

为了研究各个桥墩在地震波激励作用下的变形情况, 这里取墩顶相对位移进行分析, 见图 7 所示。相对位移指的是指定截面的绝对位移与台面激励产生的绝对位移差值, 是反应结构耗能, 局部变形情况的基础指标之一。

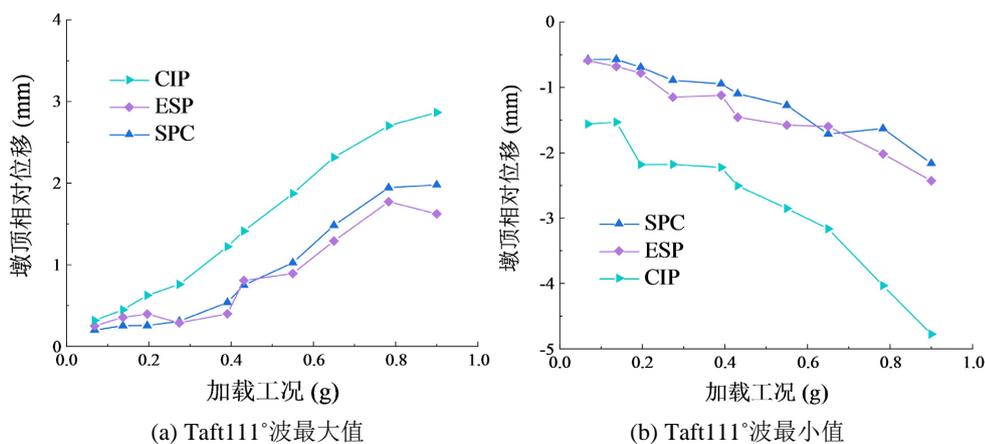


Figure 7. Taft 111° peak relative displacement of pier top

图 7. Taft111°波墩顶相对位移峰值

墩顶相对位移变化可以间接表现出桥墩的耗能能力。因此由图 7 可以得到, CIP 桥墩在地震激励下的相对位移明显更大。就装配式桥墩而言, 在开始加载时, 各装配式桥墩相对位移虽有部分差别, 但随着 PGA 的不断增大, 趋势缓慢接近。从而 CIP 桥墩的耗能能力更强, SPC 桥墩次之, ESP 桥墩的耗能能力最差。XJ 模型在加载至 0.431 g 左右时斜率方面出现突变的情况, 说明在此工况下, XJ 试件损伤加大,

墩柱需要通过剧烈晃动即耗能来保证稳定。而装配式件在加载至 0.783 g 时斜率才出现一定变化, 说明装配式件刚度更强, 耗能能力较弱。XJ 模型在加载至 0.65 g 时最值斜率又突然降低, 说明在最小值方向上损伤较最大值方向更大。

4. 结论

1) 各个桥墩均为受弯破坏, 出现了大量的横向贯通裂缝, 其动力响应和表现形式相似, 但装配式桥墩的抗震性能优于现浇桥墩。

2) 随着 PGA 的不断增大, 各个试件墩顶加速度、位移和应变响应均在增大, 自振频率不断减小, 各个试件核心混凝土和钢筋依然有传力性能, 试件阻尼比变化不大。

3) 外置钢板加强了桥墩核心混凝土约束效应, 使得桥墩整体抗震性能有所提高, 在灌浆套筒连接预制桥墩的基础上外置钢板是一种提升其抗震性能的有效方式。

参考文献

- [1] 艾庆华, 王东升, 李宏男, 孟庆利. 钢筋混凝土桥墩地震破坏振动台试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2008(5): 733-739.
- [2] 葛继平, 王志强. 干接缝节段拼装桥墩振动台试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 122-128.
- [3] Liu, Y., Li, X., Zheng, X., et al. (2020) Experimental Study on Seismic Response of Precast Bridge Piers with Double-Grouted Sleeve Connections. *Engineering Structures*, **221**, Article ID: 111023.
- [4] 武溢. 装配式桥墩在桥梁施工中的应用[J]. 山西建筑, 2019, 45(16): 123-124.
<https://doi.org/10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2019.16.063>
- [5] 欧智菁, 薛文浩, 谢铭勤, 韦建刚. 装配式混凝土桥墩施工技术综述[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 96-101.
<https://doi.org/10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.020>
- [6] Ameli, M.J. and Pantelides, C.P. (2016) Seismic Analysis of Precast Concrete Bridge Columns Connected with Grouted Splice Sleeve Connectors. *Journal of Structural Engineering*, **143**, Article ID: 101410.
- [7] Tazarv, M. and Saiidi, M.S. (2016) Low-Damage Precast Columns for Accelerated Bridge Construction in High Seismic Zones. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 21.
- [8] 魏红一, 肖纬, 王志强, 李田田. 采用套筒连接的预制桥墩抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(7): 1010-1016.
- [9] Navarrete, B.A.O., et al. (2019) Influence of Steel Jacket Thickness on the RC Bridges' Seismic Vulnerability (English Edition). *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, **123**, 236-246.
- [10] 吴灿彬, 王城泉, 张大林, 李天祺, 丁杰. 外包钢加固钢筋混凝土柱的数值模拟研究[J]. 江苏建筑, 2017(5): 28-30.
- [11] 张敏政. 地震工程的概念和应用[M]. 北京: 地震出版社, 2015.
- [12] 黄金帅. 节段拼装混凝土双柱墩抗震性能振动台试验研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2017.
- [13] 张抗, 公茂盛. NExT-ITD 方法在振动台模型参数识别中的研究[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(8): 24-26+31.
<https://doi.org/10.13905/j.cnki.dwjz.2017.08.008>