

高烈度区预制拼装桥墩振动台试验对比分析

王明晔

(上海市政交通设计研究院有限公司, 上海市 200030)

摘要: 为研究预制拼装桥墩在高烈度区的适应性,对呼和浩特市某工程的结构试件进行振动台试验,对比现浇桥墩和预制桥墩、套筒预埋在承台和套筒预埋在墩柱两种预制桥墩的试验结果,研究预制拼装桥墩抗震性能的表现,试验过程中套筒预埋在承台内的预制桥墩表现出来的抗震性能与现浇桥墩具有高度一致性,为后续预制拼装桥墩在高烈度区的推广应用提供了支撑。

关键词: 预制拼装;振动台试验;对比分析

中图分类号: U441⁺.3; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)11-0127-05

Comparative Analysis on Vibrating Table Test of Prefabricated Assembled Piers in High-intensity Zones

WANG Mingye

(Shanghai Municipal Transportation Design Institute Co., Ltd., Shanghai 20030, China)

Abstract: To study the adaptability of prefabricated assembled bridge piers in high-intensity zones, the vibrating table tests are conducted on the structural specimens of a project in Hohhot. The test results of cast-in-place bridge piers and prefabricated bridge piers, as well as two types of prefabricated bridge piers with sleeves pre-embedded in the base slab and in the pier column are compared. The seismic performances of prefabricated assembled bridge piers are studied. During the test, the precast piers with sleeves pre-embedded in the base slab shows a high degree of consistency in seismic performances with the cast-in-place piers, providing the support for the subsequent promotion and application of precast assembled piers in high-intensity zones.

Keywords: prefabricated assembled; vibrating table tests; comparative analysis

0 引言

早期,预制拼装结构主要应用于跨江跨海桥梁,跨海桥梁建设推进了桥梁全预制拼装技术的发展。近年来,随着国家政策导向,预制拼装技术在城市高架桥梁中推广。

全预制拼装技术的核心在于“预制”和“拼装”。在预制阶段,桥梁构件在工厂内按照严格的标准和规范进行生产;在拼装阶段,预制好的构件被运输到施工现场,通过专业的设备和技术进行快速拼装。桥梁构件的全预制拼装建造可以实现高效益、高质量、低成本。全预制拼装方案的全国化拓展,顺应市政建设向工业化建造方式的转变,是解决城市高架快速施工行之有效的方案。

预制拼装结构的本质是将整体结构“化整为

零”,再“集零为整”。在“集零为整”的过程中,其接缝处的力学性能,尤其是在高烈度地区,对于预制拼装结构的整体性能起决定性影响。《预制拼装桥梁技术规程》认为预制拼装桥墩抗震性能的总体表现虽与现浇混凝土桥墩接近,但对塑性铰区域的损伤、破坏机理,与现浇混凝土桥墩的破坏行为不同,高烈度危险性地区桥梁延性抗震对塑性铰区延性变形能力有更高要求,预制拼装桥墩在高地震危险地区的应用还需要更多验证。

1 工程概况

呼和浩特市昭乌达路哲理木路高架工程主线长约 10 km,位于中心区域,交通繁忙,气候严寒,年有效施工时间短。考虑快速施工要求,该工程标准段采用全预制拼装方案,是内蒙古自治区第一座全预制拼装高架桥梁^[1]。

标准段上部结构为预制简支小箱梁,下部结构中标准盖梁、标准立柱采用工厂化预制、现场拼装方

收稿日期: 2025-07-30

作者简介: 王明晔(1982—),女,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

案,钻孔灌注桩和承台采用工地现浇方案,预制构件的连接方式为灌浆套筒连接^[2]。

在设计阶段,通过建立有限元分析模型,采用纵向和横向两个方向的地震输入,并结合了反应谱和非线性时程两种分析方法,对桥梁结构的抗震性能研究表明,本工程桥梁结构通过采用铅芯橡胶支座等减隔震装置,配合合理的结构防落梁等抗震构造措施,主体结构与桥墩、基础等主要构件能满足抗震设防目标。^[3]

地震模拟振动台试验方法是目前抗震研究的重要手段之一,是通过试验很好地再现地震过程研究结构地震响应和破坏机理最直接的方法。为了更进一步验证预制拼装桥墩在高地震危险地区的应用可行性,本工程在数值有限元分析的基础上,进一步通过振动台缩尺模型试验,从结构破坏现象入手,对比现浇桥墩和预制桥墩、隔震体系和固定体系、套筒预埋在承台和套筒预埋在墩柱两种预制桥墩的试验结果,研究预制拼装桥墩抗震性能的总体表现,为全预制拼装结构在高烈度区应用提供有益参考。

2 振动台试验方案

2.1 试验模型

本工程振动台试验在同济大学多功能振动台试验室完成,利用多台振动台试验系统中的B、C两个振动台,模型缩尺比为1:4,试验对材料特性、几何特性、荷载及动力特性的物理量相似关系进行充分考虑后确定试验模型。

试验模型为两个单跨简支梁全桥模型,模型对主梁、支座、盖梁、立柱及承台均进行了模拟,如图1所示。



图1 试验模型示意图

试件一简支梁两支撑墩均为现浇桥墩,立柱一和立柱二基本参数一致;试件二简支梁两支撑墩均为预制桥墩,其中立柱一预制桥墩试件的套筒预埋于承台中,立柱二预制桥墩试件的套筒预埋于墩身底部。

盖梁、立柱及承台采用等比模型模拟,试件详细信息如表1所示。

表1 试验试件信息表

项目	试件一现浇桥墩	试件二预制桥墩
主梁重量/t	58.5	58.5
盖梁尺寸/mm	2 400×750×600	2 400×750×600
立柱一/mm	现浇 400×450	预制,套筒在承台 400×450
立柱二/mm	现浇 400×450	预制,套筒在立柱 400×450

现浇桥墩和预制桥墩材料配置一致,试件材料信息如表2所示。

表2 试件材料信息表

部位	材料	型号
立柱和承台	混凝土	C50
钢筋	主筋	HRB400
	箍筋	HPB300
套筒灌浆料	高强砂浆	C100

试件立柱配筋如图2所示。

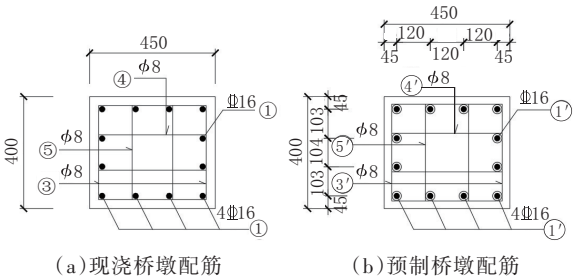


图2 试件立柱配筋(单位:mm)

设计桥墩隔震系统采用铅芯橡胶支座,根据力的相似比确定模型中的支座屈服力和所需铅芯面积,对原支座型号进行铅芯面积变更设计得到试验支座。

振动台试验模型布置如图3所示。



图3 振动台试验模型布置

2.2 加载方案

工程所处地区地震基本烈度为8度,抗震设防分类为乙类,根据《城市桥梁抗震设计规范》确定地震调整系数和地震动峰值加速度如表3所示。

表3 地震调整系数和地震动峰值加速度

工况	地震调整系数	地震动峰值加速度
E1	0.61	0.122g
E2	2.0	0.4g

试验选取白噪声、工程场地地震安评波及 EI-centro 波三条地震波,利用分级调幅后形成的多条输入地震波进行加载。地震波按顺桥向单方向输入。白噪声的加速度幅值为 0.10g,以确保试件模型在白噪声作用下处于弹性变化范围内。试件一和试件二采用相同加载方案。

本试验结构分为设置铅芯橡胶支座的隔震体系和设置固定支座的固定体系两种。

在隔震体系下加载到设计地震(0.4g)后,改为固定体系后加载至试件破坏,对比预制试件和现浇试件、隔震体系和固定体系的破坏现象,并对试验现象和试验结果进行分析。

2.3 测试方案

振动台试验过程中,实测数据有:位移和钢筋应变等。

纵向位移通过设置拉线式位移计测量,在承台、墩身、支座、盖梁、主梁共计 7 个位置布置 14 个位移计。

通过应变片对试件关键位置的纵筋、箍筋、套筒进行应变测量,纵筋应变片沿高度方向布置在墩底以下约 250 mm 至墩底以上 450 mm 范围内。

3 振动台试验结果

3.1 试验现象

3.1.1 隔震体系

为验证设计地震作用下预制拼装桥墩性能与设计需求的符合性,首先在隔震体系下将地震波加载到设计地震(0.4g)。试验现象^[2]描述如表 4 所示。

表 4 隔震体系试验现象

试件一现浇桥墩		试件二预制桥墩	
PGA (g)	立柱一	立柱二	立柱二
0.2	距墩底截面 20、40 cm 有微小裂缝	距墩底截面 30、40、50 cm 有微小裂缝	无可见裂缝
			无可见裂缝
0.3	距墩底 20~110 cm 有贯穿裂缝	距墩底 20~90 cm 有贯穿裂缝	距墩底截面 25 cm 有微小裂缝
			距墩底截面 25 cm 有微小裂缝
0.4	裂缝继续开展,有数条贯穿裂缝墩身无明显破坏	裂缝继续开展,有数条贯穿裂缝墩身无明显破坏	距墩底截面 13~75 cm 有较多裂缝开展,有数条贯穿裂缝,墩身无明显破坏
			距墩底截面 30~100 cm 有较多裂缝开展,墩底套筒顶部处有明显裂缝

由上述试验现象的描述可知,隔震体系下,加载截至 0.4g 工况,现浇与预制立柱破坏现象均仅表现

为裂缝的产生,现浇桥墩立柱可见裂缝出现于 0.2g,而预制桥墩立柱则出现于 0.3g,原因为现浇试件和预制试件在不同的场所进行支座,材料性能有所差异,预制桥墩混凝土强度略大。

套筒预埋在承台的墩柱的破坏现象与现浇桥墩基本一致,墩身有数条裂缝,但试件二立柱二由于套筒埋设于墩身,裂缝从 30 cm 高处开始产生,套筒顶部有明显裂缝。

两试件在隔震体系下加载到设计地震工况下,立柱墩身均无明显破坏。

以上试验现象可以表明:

- (1)预制立柱的抗震性能不弱于现浇立柱。
- (2)通过合理的隔震设计和合适的连接方式的选择,采用预制拼装立柱的简支结构体系能满足高烈度区结构的设计性能要求。

3.1.2 固定体系

为了进一步研究预制拼装桥墩的破坏性能,在隔震体系产生的既有损伤基础上,在试件上增设固定支座,对试件加载至破坏,对固定体系和隔震体系下的预制立柱和现浇立柱作对照分析。

固定体系下两试件破坏情况如表 5 所示^[4-5]:

表 5 固定体系破坏现象

试件一		试件二	
PGA (g)	立柱一	立柱一	立柱二
0.4	墩身贯通裂缝,墩底接缝缝隙变大	混凝土及保护层剥落	混凝土及保护层剥落
0.5	墩底混凝土保护层开始剥落	墩底砂浆层开始脱落	墩底砂浆层开始脱落
0.7	墩底四角混凝土出现大面积剥落,墩底缝隙变大,边缘混凝土压碎	墩底角点混凝土压碎,墩底产生明显的斜裂缝	角点砂浆层均脱落
1.0	钢筋出现屈服,部分核心混凝土压碎,结构刚度变小	墩底角点均严重破坏,立柱主筋可见,加载面混凝土大面积剥落	接缝外侧砂浆压碎,主筋出现滑移,立柱形成摇摆体系

现浇与预制桥墩最终破坏后,将混凝土保护层清理以后,破坏形态如图 5~图 8 所示。

加载中,对两简支梁桥均进行了多次加速度峰值 1.0g 的试验加载,最终试验现象分析如下:

- (1)现浇墩简支梁桥试件

两立柱破坏程度相当,墩底 20 cm 高度范围内混凝土破坏严重,钢筋明显屈曲,结构频率明显衰减,结构趋近倒塌。

- (2)预制墩简支梁桥试件

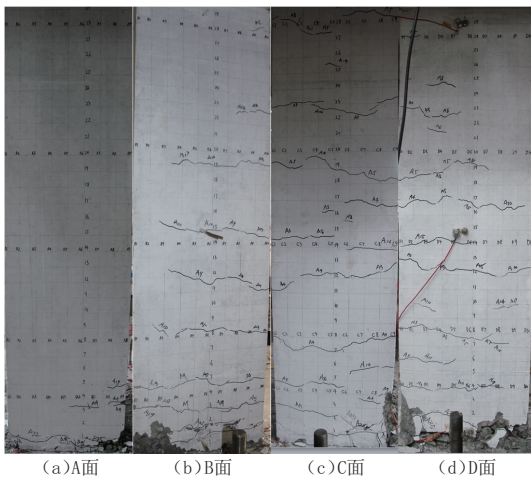


图4 试件一立柱一加载后破坏情况

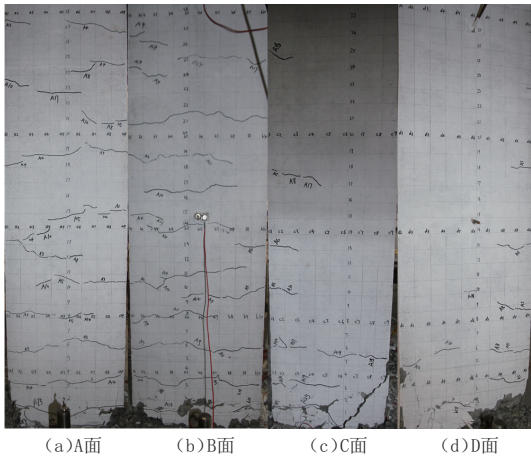


图5 试件一立柱二加载后破坏情况

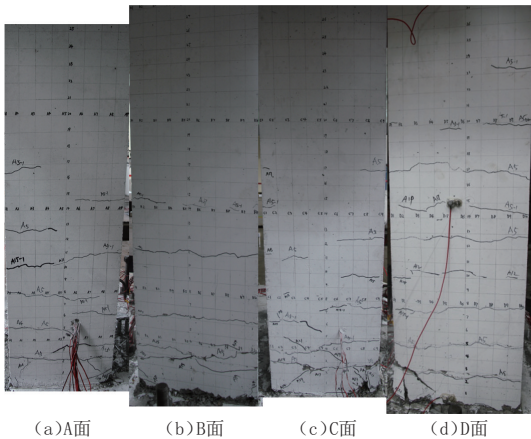


图6 试件二立柱一加载后破坏情况

两立柱破坏程度存在较大差异,立柱一整体破坏模式与现浇墩接近,墩底破坏较严重,主筋外露,但未观察到有明显钢筋弯曲现象;

立柱二墩底接缝砂浆层压碎且由于主筋粘结滑移,形成了摇摆系统,整体破坏模式与现浇墩不同^[6]。

以上试验现象进一步表明:

(1)预制立柱的抗震性能不弱于现浇立柱;

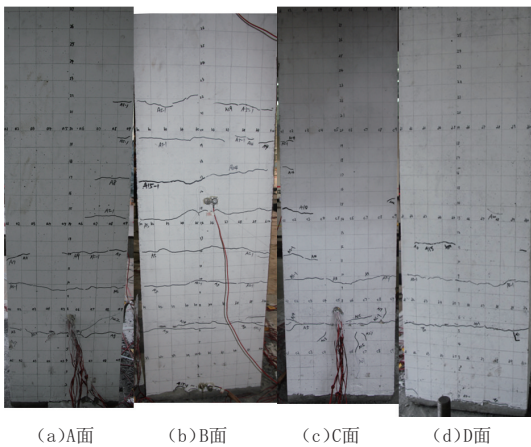


图7 试件二立柱二加载后破坏情况

(2)套筒预埋在承台内的预制桥墩表现出来的抗震性能与现浇桥墩具有高度一致性。

3.2 试验结果

3.2.1 位移反应

不同地震水平立柱各个位置相对墩底的位移峰值如图8至图11所示。

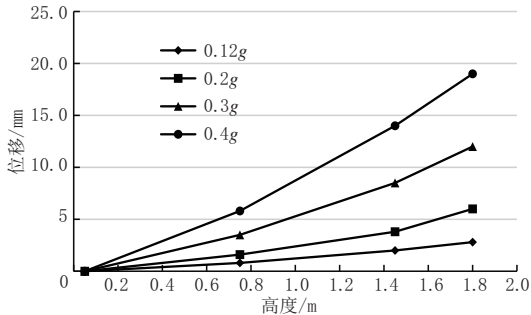


图8 试件一隔震体系位移反应

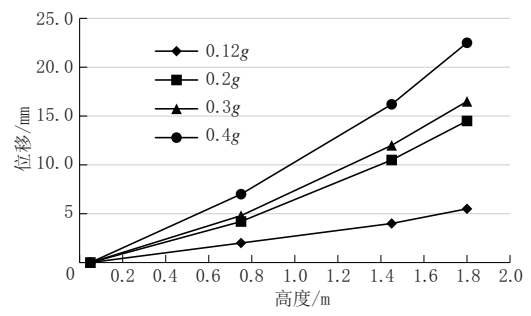


图9 试件一固定体系位移反应

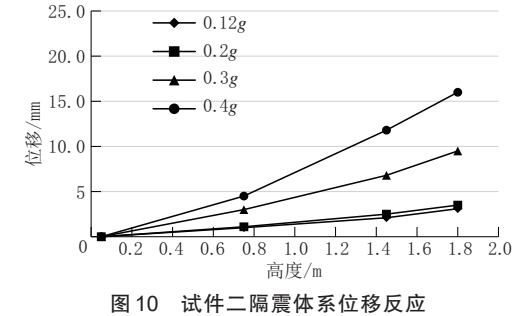


图10 试件二隔震体系位移反应

试验结果分析如下:

(1)从隔震体系和固定体系的支座位移反应的

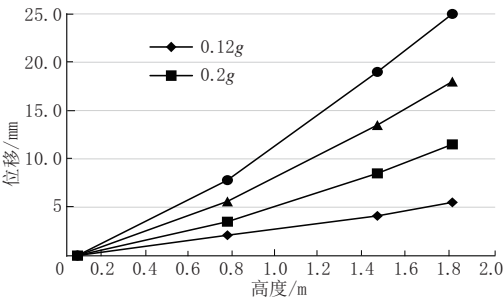


图 11 试件二固定体系位移反应

对比分析可知:采用铅芯橡胶支座后,在E2(0.4g)设计地震的作用下,试件一桥墩顶部相对墩底的位移由22.5 mm降低到了19.0 mm,而试件二桥墩顶部相对墩底的位移则由25.0 mm降低到了16.0 mm,可见铅芯橡胶支座有明显的隔震效果,进一步验证了工程设计采用隔震体系的有效性。

(2)从预制构件与现浇构件的支座位移反应的对比分析可知,在隔震体系下,E2(0.4g)设计地震时试件二桥墩顶部相对墩底的位移为16 mm,试件一为19 mm;在固定体系下,E2(0.4g)设计地震时试件二桥墩顶部相对墩底的位移为25 mm,试件一为22.5 mm。进一步验证了预制构件与现浇构件抗震性能的高度一致性,且预制构件的性能并不弱于现浇构件。

3.2.2 应变反应

不同地震水平立柱关键截面钢筋最大应变值变化情况如图12至图15。

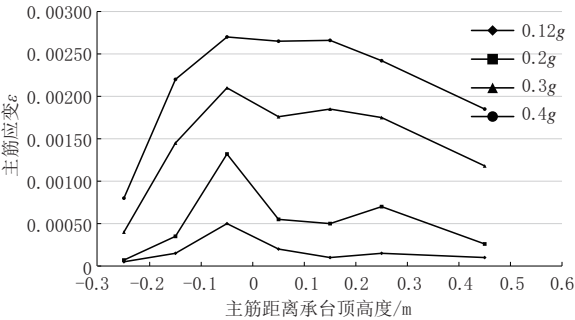


图 12 试件一隔震体系应变反应

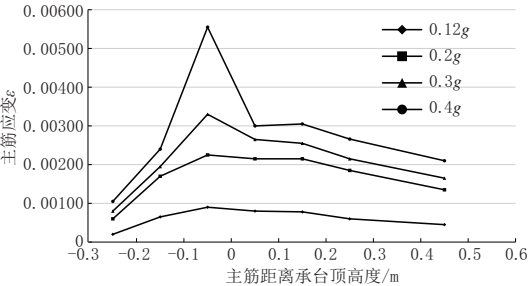


图 13 试件一固定体系应变反应

试验结果分析如下:

(1)从隔震体系和固定体系的钢筋应变反应的

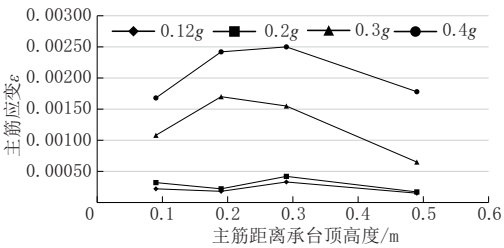


图 14 试件二隔震体系应变反应

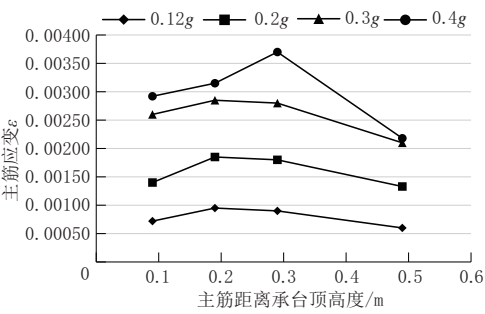


图 15 试件二固定体系应变反应

对比分析可知,固定体系钢筋的应变值较铅芯隔震体系下钢筋的应变值有20%左右的增加,根据材料性试验结果可知,当钢筋应变小于2 500 $\mu\epsilon$ 时,钢筋基本处于弹性范围。隔震体系可将钢筋控制在屈服范围内,进一步验证了工程设计采用隔震体系的有效性。

(2)从预制构件和现浇构件的钢筋应变对比分析可知,预制构件的钢筋应变与现浇构件的钢筋应变非常接近,且预制构件的钢筋应变较现浇构件略小,进一步验证了预制构件与现浇构件抗震性能的高度一致性,且预制构件的性能并不弱于现浇构件。

4 结 语

本工程在数值有限元分析的基础上,进一步通过振动台缩尺模型试验,从结构破坏现象入手,对比现浇桥墩和预制桥墩、隔震体系和固定体系、套筒预埋在承台和套筒预埋在墩柱两种预制桥墩的试验结果,研究预制拼装桥墩抗震性能的总体表现,振动台试验研究表明:

(1)预制立柱的抗震性能在多维度均不弱于现浇立柱;

(2)通过合理的隔震设计和合适的连接方式的选择,采用预制拼装立柱的简支结构体系能满足高烈度区结构的设计性能要求。采用减隔震体系不仅可以获得更优的结构抗震性能,具有更好的经济性,还为在高烈度区高架桥使用预制拼装技术创造了有利条件;

(3)套筒预埋在承台内的预制桥墩表现出来的

(下转第154页)