

套筒连接的预制拼装桥墩抗剪性能试验

王志强¹, 张杨宾¹, 蒋仕持¹, 魏红一¹, 姜海西², 闫兴非³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海城投公路投资(集团)有限公司, 上海 200335;
3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

摘要: 为了探究采用灌浆套筒连接预制拼装桥墩的抗剪性能和影响因素, 对接缝位置、截面中心增设无黏结预应力筋、拼接面增设剪力键齿的预制拼装桥墩试件及现浇混凝土桥墩试件进行了拟静力试验. 分析比较了试件的损伤发展过程和最终的破坏模式. 从滞回曲线、极限剪切承载力、变形等方面探讨了试件的抗剪性能, 并与现浇混凝土试件的抗剪性能进行了比较. 试验结果表明, 采用灌浆套筒连接构造的预制拼装桥墩主要表现为弯剪破坏模式, 变形能力和耗能能力良好, 且与现浇试件抗剪性能相近. 截面中心增设无黏结预应力筋的试件, 可提高抗剪承载力, 并降低了残余变形.

关键词: 预制拼装桥墩; 抗剪性能; 灌浆套筒; 拟静力试验
中图分类号: U443.22 **文献标志码:** A

Experimental Study of Shear Performance of Precast Segmental Bridge Piers with Grouted Splice Sleeve

WANG Zhiqiang¹, ZHANG Yangbin¹, JIANG Shichih¹, WEI Hongyi¹, JIANG Haixi², YAN Xingfei³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai City Road Investment (Group) Co. Ltd., Shanghai 200335, China; 3. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co. Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: In order to study the factors such as the joint position, unbonded prestressed tendons, shear keys affecting the shear performance of precast segmental bridge pier with grouted splice sleeve, quasi-static tests of four precast segmental bridge piers and one cast-in-place concrete pier were conducted. The damage development and failure mode of models were discussed. Their shear performance was summarized by analyzing hysteresis curves, ultimate shear capacity, displacement capacity. The shear performance of precast segmental bridge pier was compared with the cast-in-place concrete specimen. The experimental results show that the failure mode of precast segmental bridge pier with grouted

splice sleeve was bending-shear failure. The precast segmental bridge pier has a good displacement capacity and energy dissipation which is similar to the shear performance of cast-in-place specimen. Adding unbonded prestressed tendons in the center of the section increases the shear bearing capacity and reduces the residual deformation.

Key words: precast concrete segmental column; shear performance; grouted splice sleeve coupler; pseudo-static test

节段拼装施工技术具有工厂化制作、模块化施工、质量高、周期短等优点. 随着节段拼装桥墩建造技术的推广和应用, 特别是在中等、高地震危险性区域桥梁工程下部结构中的应用, 节段拼装桥墩在地震作用下的抗剪性能如何, 给桥梁设计人员和业主决策带来很大的疑虑和困扰, 成为阻碍其推广应用的一个重要因素.

目前, 国内外对节段拼装桥墩抗剪性能的研究开展较少, 主要是对现浇混凝土桥墩抗剪性能进行了大量的理论和试验研究. 文献[1-4]对现浇钢筋混凝土桥墩抗剪开展了试验和数值分析研究, 研究认为塑性铰区由于水平、剪切斜裂缝的开展使混凝土有效抗剪截面积减小, 地震作用下桥墩抗剪强度将随着延性系数的增大而快速衰减, 当低于桥墩的弯曲强度时会发生塑性铰区的剪切破坏. 而对节段拼装桥墩抗震性能的研究主要集中在抗弯承载能力、耗能和延性变形等方面^[5].

与传统现浇钢筋混凝土桥墩不同, 预制拼装混凝土桥墩一般都存在拼接缝. 这可能导致预制拼装桥墩抗剪性能受到拼接缝的影响, 而与传统现浇混凝土桥墩剪切行为存在显著差别.

为了准确了解预制拼装桥墩在地震作用下的抗剪性能, 需要对预制桥墩及拼接缝的力学行为进行

仔细研究. 关于拼接缝的力学性能研究, 现有的研究主要集中在预制节段箱梁方面. 文献[6]进行了三片节段预制简支梁的试验研究, 试验观察到在最终的破坏阶段, 剪力键的部分键齿块被剪坏. 文献[7]进行了节段预制三跨连续梁模型试验, 试验表明, 在正常使用极限状态, 采用干接缝的边跨的挠度比采用胶接缝的边跨的挠度要大, 环氧接缝跨的开裂荷载是干接缝跨的 2 倍左右. 文献[8]通过对节段梁接缝的抗震力学行为研究, 认为采用有黏结和无黏结预应力筋混合配置具有较好的抗震性能. 文献[9]还对节段拼装主梁进行了有限元数值分析, 指出模拟接缝的非线性行为至关重要. 文献[10-11]结合我国预制节段梁特点, 也开展了试验和数值分析研究, 研究认为, 接缝对于模型梁抗剪性能有较大影响.

文献[12]进行了单键齿和三键齿剪力键的抗剪试验, 研究表明, 对设有剪力键的接缝来说, 裂缝总是首先出现在键齿块的根部, 当接缝面上的正压力相同时, 多键剪力键其单个键块的抗剪强度往往要比相同尺寸的单键剪力键要小. 文献[13]也对剪力键进行了抗剪试验和数值分析研究, 研究认为带键齿干接缝试件的抗剪强度高于平面干接缝试件, 但是低于整体无接缝试件.

国外关于节段拼装预应力混凝土桥墩这种体系的抗震性能已有较多的研究. 文献[14]对大比例尺寸的无黏结节段拼装预应力混凝土桥墩进行了循环加载试验研究, 研究其强度和变形性能, 此外还对这种体系的抗震设计方法进行了研究. 文献[15-16]通过一系列静、动力有限元分析调查了无黏结后张预应力混凝土桥墩的滞回特性和动力响应, 没有考虑接缝及接缝间的剪切滑移等影响. 文献[17-18]开展了大比例尺(1:2.5)空心截面节段拼装桥墩的拟静力试验研究, 研究结果表明, 附加耗能装置可以增加试件的强度, 增加黏滞阻尼比, 可以在高地震区域使用. 文献[19]对带有耗能钢筋的干接缝节段拼装桥墩进行了拟静力试验研究, 研究结果表明, 与常规钢筋混凝土桥墩相比, 该种类型桥墩具有损伤小和震后拟静力残余位移小等优点. 文献[20]通过振动台试验研究了预制拼装桥墩的抗震性能, 试验表明, 预制拼装桥墩具有良好的抗震性能. 文献[21]对灌浆套筒连接预制拼装桥墩抗震性能进行了非线性有限元数值模拟分析研究, 通过纤维截面梁柱单元模拟预制拼装桥墩的损伤行为, 表明分析模型具有较好的精度.

从上述研究可以看出, 国内外学者对预制拼装桥墩弯曲延性抗震性能及节段拼装主梁开展了大量

的研究, 但文献中很少涉及对预制拼装桥墩在地震作用下的抗剪性能和拼接缝抗剪机理的研究, 目前关于预制拼装桥墩的抗剪性能研究几乎处于空白阶段.

本文以灌浆套筒连接预制拼装桥墩试件为对象进行抗剪性能拟静力试验研究, 分析了试件水平力-位移响应, 受力损伤过程及最终破坏模式; 同时探讨了不同接缝位置、是否设置剪力键及中心无黏结预应力筋对预制拼装桥墩抗剪性能的影响, 以期为实际工程设计提供理论参考.

1 试验概况

1.1 试验设计和制作

灌浆套筒连接预制拼装桥墩是指预制墩身节段与承台、盖梁或相邻墩身节段间通过灌浆套筒连接伸出的钢筋, 连接件套筒构造示意图见图 1. 该连接构造特点是施工精度要求高, 避免现场浇注和张拉预应力筋, 施工所需时间短. 根据灌浆套筒联接构造的特点(见图 2), 灌浆套筒可以预埋在预制墩身底部或承台顶部.

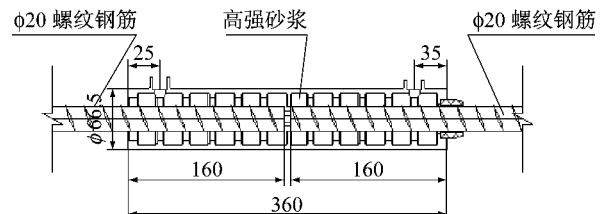


图 1 灌浆套筒连接件构造示意图(单位:mm)

Fig. 1 Detail of grouted splice sleeve(unit:mm)

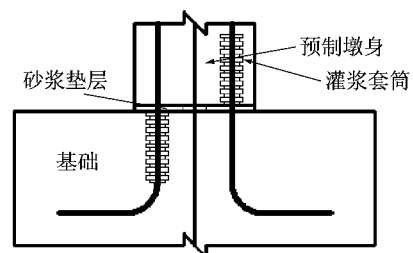


图 2 套筒设置在承台(左)、墩身(右)处

Fig. 2 Sleeve placed in cap (left) and pier (right)

本文试验共设计了 5 个试件, 现浇混凝土桥墩 0[#] 试件, 用于与预制试件的比较, 试件基本参数见表 1. 其中, 2[#] 试件剪跨比为 2.64, 但加载点距离拼接缝处的剪跨比仍为 1.7, 各试件构造尺寸如图 3 所示. 0[#]、1[#] 和 4[#] 试件墩身设计尺寸为 530 mm × 500 mm × 700 mm, 加载端尺寸为 900 mm × 500 mm ×

表 1 试件参数表

Tab. 1 Parameters of specimens

试件编号	试件类型	剪跨比	拼接缝位置	纵筋配筋	箍筋配筋	预应力筋		轴压比/%
						配筋	预加应力/MPa	
0#	现浇	1.70	无	10Φ20	Φ8@50	无	0	7.73
1#	预制	1.70	墩身节段间	10Φ20	Φ8@50	无	0	7.73
2#	预制	2.64	墩身节段间	10Φ20	Φ8@50	无	0	7.73
3#	预制	1.70	墩底	10Φ20	Φ8@50	无	0	7.73
4#	预制	1.70	墩底	10Φ20	Φ8@50	有	780	10.70

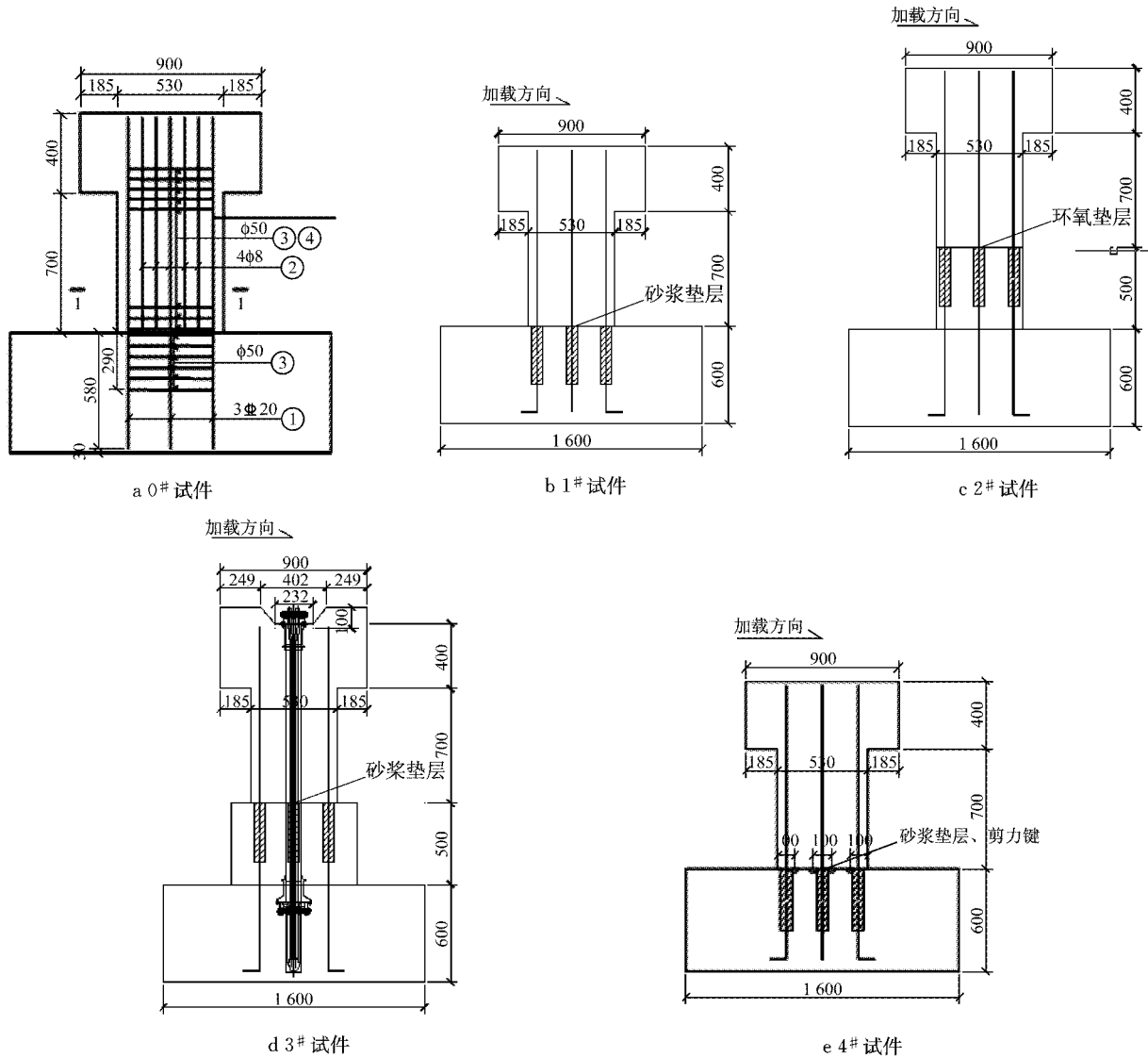


图 3 试件构造示意图(单位:mm)

Fig. 3 Geometry of pier specimens(unit: mm)

400 mm,底座尺寸为 1 600 mm×1 600 mm×600 mm. 1# 和 4# 试件灌浆套筒预埋在承台,2# 试件拼接缝连接形式采用环氧垫层,1# 和 4# 试件拼接缝均采用高强无收缩砂浆. 对于 2# 试件,因灌浆套筒预埋在桥墩里,桥墩高度增加 500 mm. 对于 3# 试件,预应力筋在加载端顶部张拉,因此加载端增高到 500 mm,并预留张拉槽,预应力筋锚固在底座里,灌浆套筒预埋在新增的扩大底座上,其尺寸为 770 mm×

740 mm×500 mm.

0# ~4# 试件的桥墩截面配筋设计如图 4 所示. 纵筋采用直径 20 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋,纵筋穿过拼接缝,并通过灌浆套筒连接. 箍筋、拉筋采用直径 8 mm 的 HPB300 热轧光圆钢筋,箍筋外净保护层 15 mm. 3# 试件在截面中心增设无黏结预应力钢绞线,预应力筋采用 ϕ^s 15. 2 的钢绞线,有效面积为 139 mm²,抗拉强度标准值为 1 860 MPa.

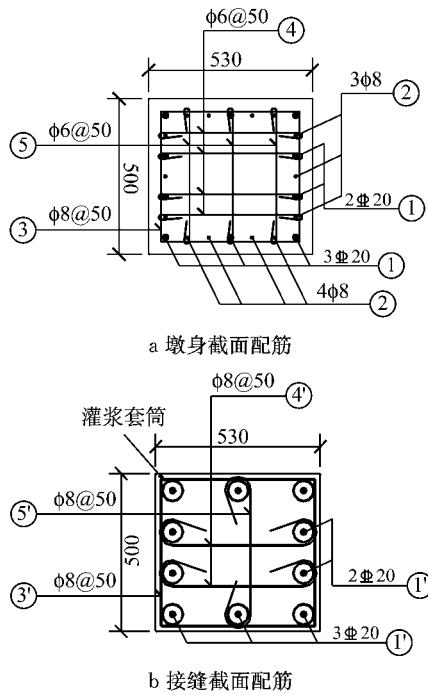


图 4 桥墩截面配筋设计(单位:mm)
Fig. 4 Reinforcing arrangement of pier specimens(unit: mm)

1.2 试件加载方法及量测内容

预制拼装桥墩拟静力试验加载装置见图 5。竖向荷载由 2 台工作吨位各 100 t 的千斤顶施加,竖向总荷载为 56.0 t,对应轴压比为 7.73%。水平往复荷载由加载吨位 1 500 kN,位移行程为 ±250 mm 的电液伺服作动器施加。试验数据采用国产 DH 3817 数据

自动采集系统进行采集,采集频率为 5 Hz。试验采用位移加载制度,每级位移进行 3 个循环加载,各级加载幅值依次为 2、4、6、8、10、15、20 mm,随后每级增加 5 mm。每级加载第一、二个循环加载位移为此级加载幅值,第三个循环加载位移为前一级加载幅值,其后荷载等级加载制度同第二级,直至试件的强度下降到最大强度的 80%,加载结束。



图 5 实际试验加载图
Fig. 5 Experimental loading system

考虑到试验试件可能发生弯剪破坏或剪切破坏,量测的内容有墩身曲率分布、桥墩剪切角、墩身关键位置水平位移、接缝区域的钢筋及箍筋和预应力筋的应变、水平荷载和竖向荷载。试件应变片布置如图 6 所示。图中,SL 代表纵筋编号,Sh 代表箍筋编号。

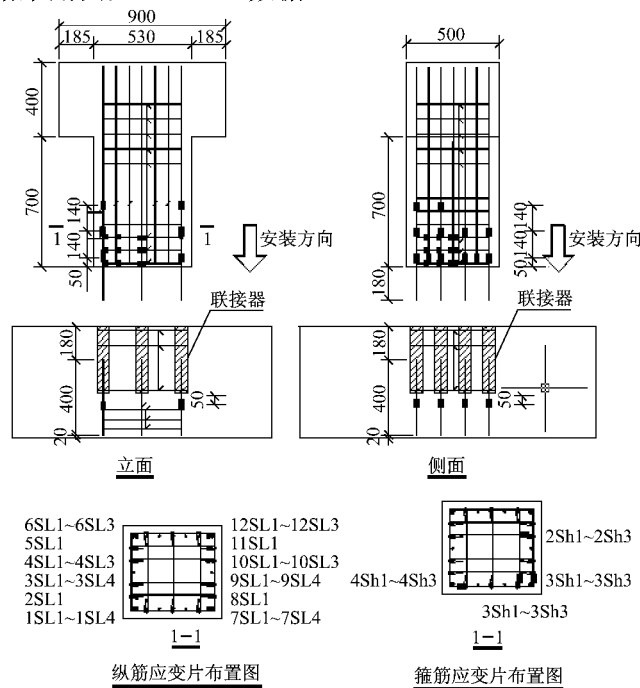


图 6 试件应变片布置图(单位:mm)
Fig. 6 Strain gages number of pier specimens(unit: mm)

2 试验结果和分析

2.1 试件损伤现象描述和比较

图7和图8分别描述了试件的裂缝分布和试件最终破坏形态.各试件损伤发展过程和最终破坏模式描述如下:

开始加载时,随加载荷载的逐步增大,所有试件在墩身底部或接缝处首次出现一条发丝般微小裂缝,卸载后裂缝闭合.

加载至8 mm,0#试件沿墩身出现多条弯曲裂缝,裂缝宽度0.04~0.60 mm,同时在加载侧面出现1~2条斜裂缝,卸载后裂缝闭合.1#和4#试件在墩身分别出现1~2、2~3条弯曲裂缝,接缝处裂缝宽度约为1.00 mm,墩身并伴有1~2条斜裂缝出现;而2#和3#试件在墩身出现1条弯曲裂缝,裂缝宽度为0.30 mm,接缝处裂缝张开约为0.33 mm,卸载后裂缝闭合.

继续加载至20 mm,所有试件墩身出现的弯曲裂缝和斜裂缝逐渐增多,裂缝宽度0#为0.24~4.00 mm,1#为0.30~5.00 mm,2#增大为1.60~2.00 mm,3#为0.20~5.00 mm,4#为0.10~6.00 mm.0#、1#、3#、4#试件接缝处在正反两方向荷载作用下产生的裂缝已贯通,墩底处形成斜向贯通裂缝,且有竖向裂纹发展,墩底混凝土保护层有脱落的趋势.2#柱身只存在1条裂缝,原因在于下节段上部预埋灌浆套筒,使得这一区域刚度很大从而较难开裂.3#扩大承台出现1~2条弯曲裂缝和斜裂缝,裂缝宽度为0.20 mm.4#试件墩底混凝土保护层脱落,厚度约为1 cm.

继续加载至40 mm,在距离承台20 cm高度内,混凝土竖向、斜向裂缝交错发展,特别是墩底区域竖向裂缝发展丰富,0#、1#、2#、4#分别在10、10、5、10 cm高度内,混凝土保护层大量脱落,0#试件在加载侧面斜裂缝间距约为15 cm,并逐渐贯通;1#试件接缝张开约10.00~20.00 mm,4#试件接缝开裂宽度约为11.00 mm.此外,3#试件扩大承台存在1~2条弯曲裂缝和斜裂缝,多条斜裂缝,但裂缝宽度较小,在承台上方,墩身10 cm区域,保护层部分脱落.此阶段所有试件强度相对峰值强度开始有所退化,退化比例1#试件为5%~13%,其余试件约为10%.

试验加载结束时,混凝土保护层剥落严重,裸露出来的部分箍筋发生变形.试验过程中观察到3#~4#试件混凝土保护层剥落后,裸露出来的箍筋保持

完好,没有鼓出现象.2#、3#试件加载时桥墩未出现整体滑移现象.但1#、4#加载时桥墩出现整体滑移现象,1#试件从+55.00 mm到-55.00 mm时滑移35.00 mm,从-55 mm到0.10 mm时滑移20.00 mm,4#试件从0 mm加载到50.00 mm时滑移2.00 mm,从50.00 mm加载到-50.00 mm时滑移16.00 mm,从-50.00 mm加载到0 mm时滑移16.00 mm.清除保护层混凝土后,各试件破坏状态见图8.从图中可看出,0#、1#、4#试件主筋已发生受压屈服,2#、3#墩底少许核心混凝土碎裂,两者都是一根主筋受拉断裂,部分主筋屈服.

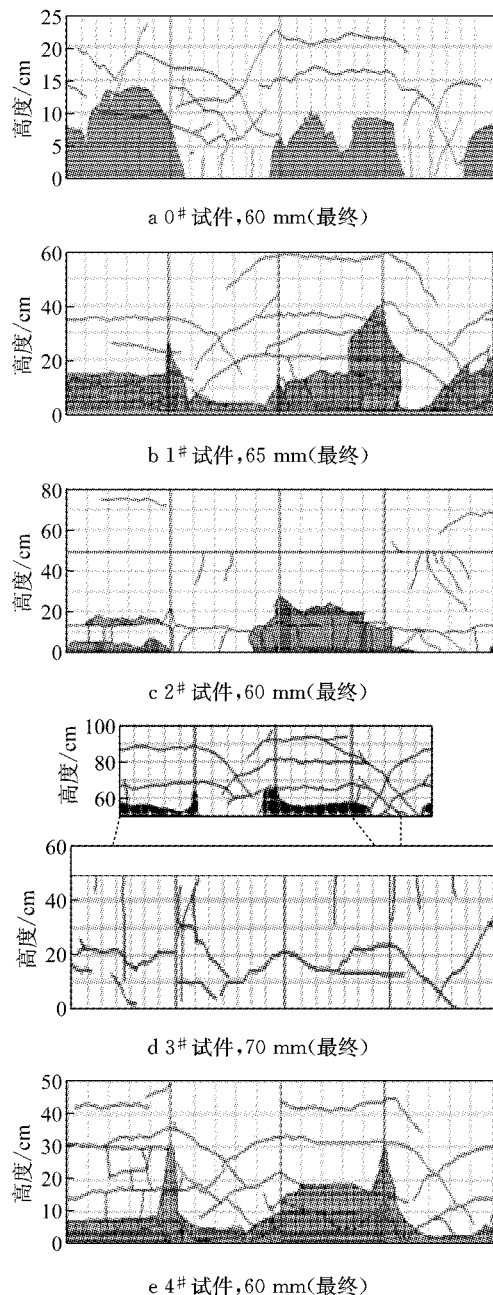


图7 试件裂缝开展图

Fig. 7 Development of crack

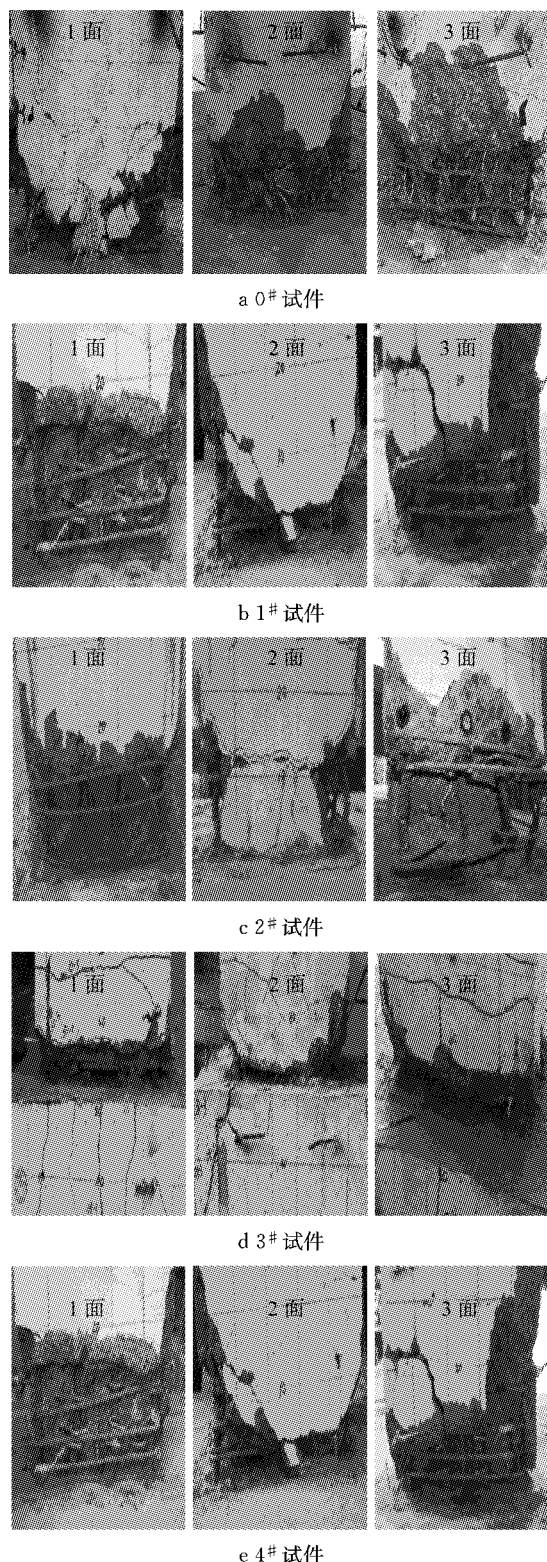


图 8 试件损伤照片

Fig. 8 Damage state

从 1# 试件和 4# 试件的损伤破坏现象和最终的破坏模式看, 4# 试件在最终破坏阶段, 接缝处剪力主要由接缝间动摩擦力传递, 纵筋也可能传递小部分剪力. 在此过程中, 随着纵筋与混凝土黏接失效、纵

筋屈曲、部分核心混凝土破坏, 以及墩身和承台发生相对滑移等原因, 试件的抗剪承载力不断下降, 直至试件承载力下降过大而终止试验. 4# 试件接缝处设置剪力键的效应不明显, 最终破坏时, 接缝处张开达 20.00~30.00 mm, 剪力键齿尺寸突出高度仅为 10.00 mm, 相对较小, 接缝处下表面剪力键齿与上表面没有接触, 因此, 剪力键齿没有发挥作用, 两个试件最终均沿接缝界面发生整体的滑移.

2.2 试验结果分析

2.2.1 滞回性能

试验获得的预制桥墩试件力-位移滞回曲线反映了该试件的基本抗震性能特点, 包括延性变形能力、耗能能力和残余变形等^[22]. 通常, 在混凝土试件进入非线性变形后, 随着加载位移的增长而水平力不断变化得到的滞回曲线可分为梭形、弓形、反 S 形和 Z 形等基本形态^[23], 根据滞回曲线的形态可以判断试件的破坏机制. 本文各个试件的实测水平力-墩顶位移滞回曲线如图 9 所示.

各试件在较低荷载阶段, 基本处于弹性阶段, 滞回曲线集中和重叠; 随着混凝土开裂、钢筋的屈服, 滞回环逐渐拉开呈现梭形; 而后由于接缝的张开和滑移向弓形发展; 到加载后期, 滞回曲线呈扁平的四边形. 整体而言, 0#、1#、2# 和 4# 试件均为弯剪破坏, 具有相对饱满的滞回环和较缓的强度退化. 0# 试件滞回曲线“捏拢”效应不明显, 1# 和 4# 试件滞回曲线“捏拢”效应较严重, 这是加载后期发生整体滑移所致. 3# 试件在变形 4~5 cm 之间, 存在一个强度突然变化, 随后强度趋于稳定的现象, 这主要是因无黏结预应力筋导致的. 0#、2# 试件的滞回曲线相对较为饱满, 接近于延性破坏的梭型.

2.2.2 骨架曲线和极限剪切承载力

滞回曲线的峰值点连接形成试件的骨架曲线. 骨架曲线的形状大体上和单调加载得到的力-位移曲线相近, 极限承载力略低一些, 能够比较明显地反映构件的初始刚度、最大强度、屈后刚度、延性等抗震性能指标. 整个骨架曲线的峰值点即为试件的极限剪切承载力. 各试件骨架曲线如图 10 所示.

表 2 给出 5 个试件的极限剪切承载力及对应的位移. 由图 10 和表中数据可知, 0#、1# 和 4# 试件的骨架曲线和主要力学指标相近, 表明预制试件力学性能与现浇混凝土很相近; 3# 试件因预应力筋存在, 与 2# 试件相比, 极限剪切承载力增大.

2.2.3 位移延性

位移延性大小是构件抗震能力强弱的重要指标

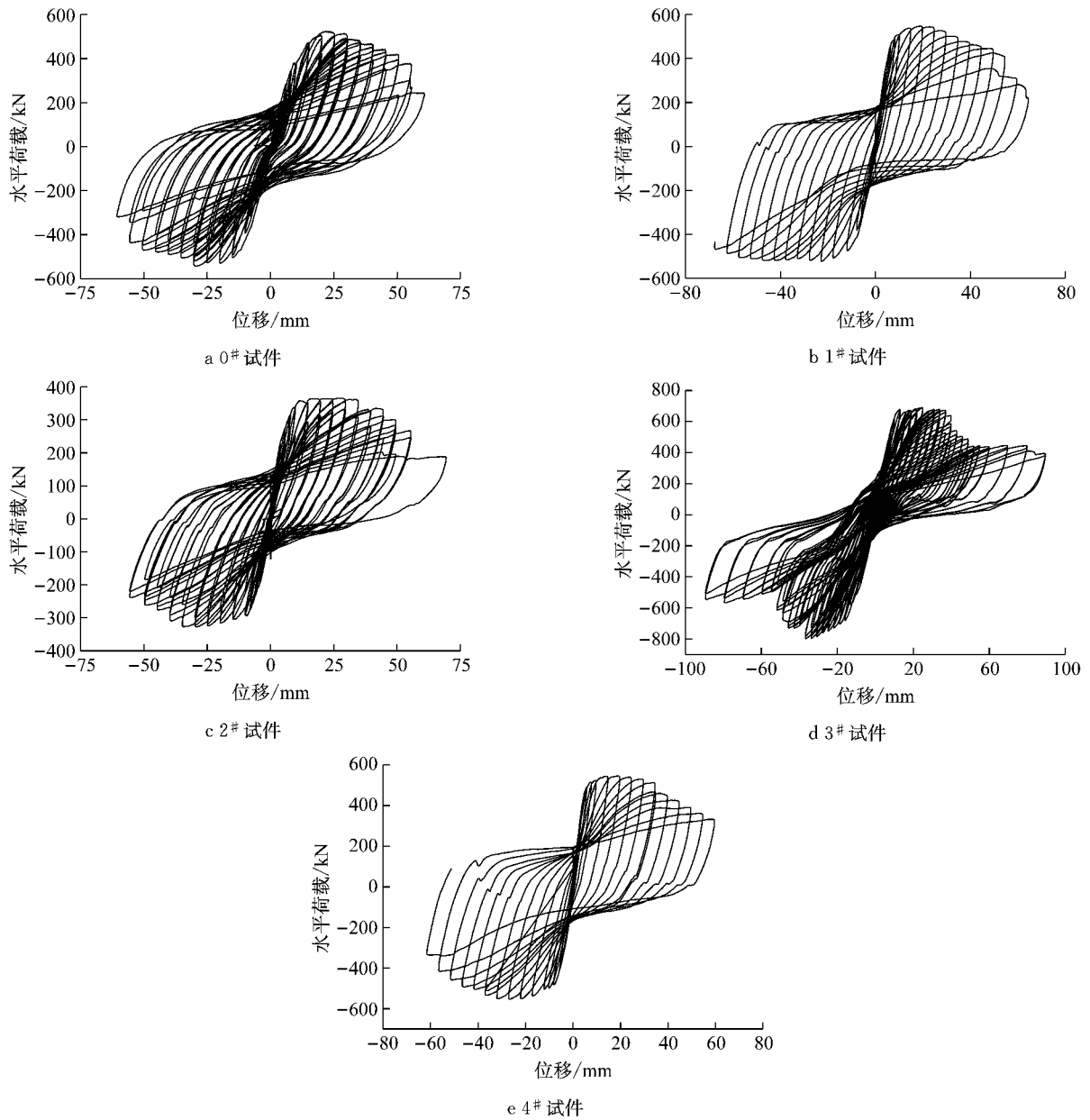


图 9 试件水平力-位移滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic curves of load-displacement

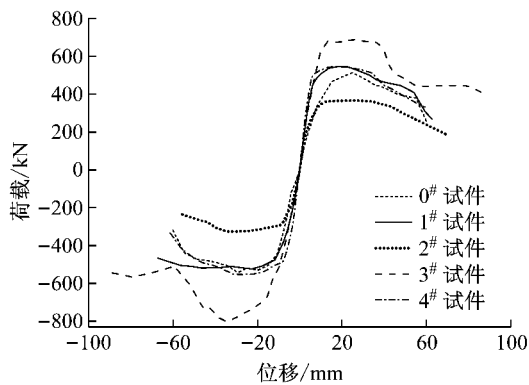


图 10 试件骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves

非弹性变形的能力. 0#~4# 试件的位移延性系数结果见表 3. 从表中数据可知, 0#、1#、2# 和 4# 位移延性系数均大于 8, 具有较好的位移延性变形能力, 也表明试件最终的破坏模式不是脆性破坏; 3# 试件的位移延性系数较低, 主要原因在于在 4~5 cm 之间

表 2 试件极限剪切承载力

Tab. 2 Ultimate shear bearing capacity

试件编号	剪切承载力/kN	加载位移/mm
0#	542.0	20.2
1#	546.4	18.9
2#	366.0	27.7
3#	690.1	24.7
4#	545.7	19.2

之一, 是指在试件强度没有明显降低的情况下, 构件

发生强度突然降低,最后趋于稳定,最终的变形能力因预应力筋的存在,反而较大。

表 3 试件位移延性系数

Tab. 3 Coefficient of displacement ductility

试件编号	屈服位移/mm	极限位移/mm	位移延性能力
0 [#]	5.5	45.1	8.1
1 [#]	5.6	49.2	8.8
2 [#]	6.1	50.0	8.2
3 [#]	7.8	45.7	5.9
4 [#]	4.6	41.8	9.1

2.2.4 试件破坏机理与性能评价

与 0[#] 现浇混凝土试件比较,1[#]~4[#] 由于试件中存在拼接缝、灌浆套筒和预应力筋等特殊构造,其破坏机理和最终破坏形态与传统现浇混凝土桥墩破坏过程与形态有一定的差异,而破坏的形式与过程影响着试件剪力的传递方式与路径。为了研究试件的抗剪性能,下面对 5 个试件的破坏过程与破坏机理进行分析与说明,并对其抗剪性能做出定性评价。

0[#] 试件在加载初期墩身底部区域开裂,随着荷载增大,沿墩身高度范围裂缝逐步产生,斜裂缝出现,无明显裂缝开展集中现象,剪力主要由钢筋、核心混凝土传递。1[#]、4[#] 试件拼接缝在加载初期开裂,剪力主要由钢筋、核心混凝土传递至承台,随着加载位移的增大和正反两方向循环荷载作用下,斜裂缝产生,但拼接缝张开成为主要破坏形式,剪力在墩身主要由混凝土和箍筋传递,而在墩底接缝处主要由核心混凝土、纵筋和摩阻力传递。继续加载,拼接缝处的纵筋与核心混凝土失去黏接,1、3 面外层部分核心混凝土碎裂。0[#] 试件无整体滑移发生,1[#] 和 4[#] 试件发生整体滑移,纵筋压屈。此阶段,接缝处剪力主要由接缝间动摩擦力传递。相比于 1[#] 试件,4[#] 试件增设剪力键齿提高抗剪的效应不明显,分析原因是因剪力键齿尺寸较小,接缝张开的较大,没有发挥作用。

2[#] 试件在加载初期主要存在 3 条弯曲裂缝,即接缝处、墩身底端和距离承台 10~14 cm 处,见图 7c。此阶段的抗剪薄弱截面主要在于墩底开裂截面。继续加载,试件破坏主要集中于墩身距承台 14 cm 以下部位,在此区域逐渐形成塑性铰,接缝破坏不明显,此阶段试件水平承载力变化不大。随后此区域混凝土保护层脱落,纵筋与混凝土黏接失效,部分核心混凝土碎裂,纵筋屈曲、断裂,水平承载力降低,试验结束。

3[#] 试件由于预应力筋的存在使得轴向力和静摩擦阻力的贡献增加,因而极限剪切承载力比 0[#]、1[#] 和

4[#] 大。破坏现象与 2[#] 试件类似,见图 8d。而在试验后期,其承载力下降后趋于稳定,形成“不倒翁”结构,在预应力作用下,加载位移不断变大,而承载力变化较小。

从上面论述可知,0[#]、1[#]、2[#] 和 4[#] 试件具有较高的位移延性系数和较大延性变形能力,其在达到最大承载力后下降速度缓慢。对于 3[#] 试件,损伤后残余位移较小。预制试件剪切承载力取决于纵筋、箍筋布置、预应力筋和接缝处的力学行为等因素,但具体的预制桥墩,可能会由某一因素控制,如 1[#] 和 4[#] 试件,因发生了轻微滑移,最终剪切能力取决于拼接缝的力学行为,3[#] 试件还受到预应力的影响;而 0[#] 和 2[#] 试件取决于墩底塑性铰区域的剪切承载力。总体来看,1[#] 和 4[#] 预制试件与 0[#] 现浇试件抗剪性能基本相似,因此 1[#] 和 4[#] 试件构造可用于地震中、高危险区域,但震后需要对接缝区域进行检查或必要的维护。

3 结论

(1) 采用灌浆套筒连接的 1[#] 和 4[#] 预制试件,试验加载初期和中期均未发生剪切滑移破坏,在加载接近破坏时,1[#] 和 4[#] 预制试件拼接面发生了剪切滑移,此时试件纵筋也发生了屈曲,0[#] 现浇试件没有发生滑移;0[#]、1[#] 和 4[#] 试件最终破坏模式为弯剪破坏。

(2) 从试件试验获得的滞回曲线、骨架曲线、强度和延性数值可以看出,采用灌浆套筒连接的 1[#] 和 4[#] 预制试件与 0[#] 现浇试件基本相近,表明预制试件的抗剪性能与现浇试件相近。

(3) 套筒预埋在墩身下节段的试件具有较大的剪跨比,其破坏区域集中于墩底无套筒区域,而接缝和墩身破坏很小,试件发生弯曲破坏。

(4) 4[#] 试件拼接面设置的剪力键齿尺寸较小,接近最终破坏时,拼接缝张开较大,剪力键齿未能发挥作用,与 1[#] 试件类似,最终沿拼接缝界面发生了滑移。

(5) 截面中心设置无黏结预应力筋,增大了预制试件的抗剪承载力,残余变形小,具有较好的自复位能力。

参考文献:

- [1] 顾毅云,卓卫东. 浅论强震动下钢筋混凝土桥墩的残余抗剪强度[J]. 福建建筑,2003(2):30.

- GU Yiyun, ZHUO Weidong. Discussion on residual shear strength of RC bridge columns under strong earthquake ground movement [J]. *Fujian Architecture*, 2003(2):30.
- [2] 汪日光,叶献国. 钢筋混凝土桥墩模型抗剪计算对比和分析 [J]. *安徽建筑工业学院学报*, 2008(1):16.
- WANG Riguang, YE Xianguo. Comparison and analysis for the shear strength calculation of reinforced concrete bridge pier model [J]. *Journal of Anhui Institute of Architecture*, 2008(1):16.
- [3] 徐斌,唐光武,赵彦. 桥梁抗震设计中桥墩抗剪能力计算公式的评价 [J]. *公路交通技术*, 2010(6):51.
- XU Bin, TANG Guangwu, ZHAO Yan. Evaluation of calculation formulae for resistance to shear stress of piers in anti-seismic design of bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010(6):51.
- [4] 王东升,司炳君,孙治国,等. 地震作用下钢筋混凝土桥墩塑性铰区抗剪强度试验 [J]. *中国公路学报*, 2011(2):34.
- WANG Dongsheng, SI Bingjun, SUN Zhiguo, *et al.* Experiment on shear strength of reinforced concrete bridge column in plastic hinge zone under seismic effect [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011(2):34.
- [5] 李田田. 城市高架节段拼装桥墩构造及抗震性能研究 [D]. 上海:同济大学, 2013.
- LI Tiantian. Research on structural details and seismic performance of urban viaduct precast segmental concrete column [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [6] RABBAT B G, SOWLAT K. Testing of segmental concrete girders with external tendons [J]. *PCI Journal*, 1987(3):86.
- [7] MAC GREGOR J G, KREGER M E, BREEN J E. Strength and ductility of a three-span externally post-tensioned segmental box girder bridge model [R]. Austin: Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin, 1989.
- [8] MEGALLY S H, GARG M, SEIBLE F, *et al.* Seismic performance of precast segmental bridge superstructures [R]. San Diego: University of California San Diego, 2001.
- [9] MEGALLY S H, VELETZOS M J, BURNELL K. Seismic performance of precast segmental bridges: summary of experimental research on segment-to-segment joints [J]. *PCI Journal*, 2009(2):139.
- [10] 李国平. 体外预应力混凝土筒支梁剪切性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2006, 40(2):58.
- LI Guoping. Experimental study on the shear behavior of simply-supported externally prestressed concrete beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 40(2):58.
- [11] 李甲丁. 南京长江四桥节段预制拼装刚构体系与抗剪性能研究 [D]. 南京:东南大学, 2010.
- LI Jiading. Static and seismic behavior of precast segmental rigid frame bridges in the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [12] ZHOU Xiangming, MICKLEBOROUGH N, LI Zongjin. Shear strength of joints in precast concrete segmental bridges [J]. *ACI Structural Journal*, 2005(2):3.
- [13] 陈黎. 预制节段式混凝土桥梁干接缝抗剪性能研究 [D]. 广州:广东工业大学, 2013.
- CHEN Li. Study on shear behavior of prefabricated segmental concrete bridge with dry joint [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
- [14] HEWES J T. Seismic design and performance of precast concrete segmental bridge columns [D]. San Diego: University of California, 2002.
- [15] KWAN W P, BILLINGTON S L. Unbonded posttensioned concrete bridge piers. I: monotonic and cyclic analyses [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2003, 8(2):92.
- [16] KWAN W P, BILLINGTON S L. Unbonded posttensioned concrete bridge piers. II: seismic analyses [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2003, 8(2):110.
- [17] WANG Juichen. Testing and behavioral study of precast segmental columns [D]. Taipei: National Taiwan University, 2005.
- [18] OU Yuchen, CHIEWANICHAKORN M. Seismic performance of segmental precast unbonded posttensioned concrete bridge columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133(11):1636.
- [19] PALEMERMO 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.
- [20] MOTAREF S, SAIIDI M S, SANDERS D. Shake table studies of energy-dissipating segmental bridge columns [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 19(2):186.
- [21] AMELI M J, PANTELIDES C P. Seismic analysis of precast concrete bridge columns connected with grouted splice sleeve connectors [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(2):04016176.
- [22] HOSE Y D, SEIBLE F. Performance evaluation database for concrete bridge components and systems under simulated seismic loads [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 1999.
- [23] 朱伯龙. 结构抗震试验 [M]. 北京:地震出版社, 1989.
- ZHU Bolong. Structural seismic test [M]. Beijing: Seismological Press, 1989.