

装配式钢筋套筒灌浆连接技术的应用

张基成 刘建峰 刘泽甫 乔智勇 王日鑫

徐州市公路事业发展中心 江苏 徐州 221000

【摘要】：灌浆套筒连接装配式混凝土桥墩已经在桥梁工程中得到应用，在横向荷载，尤其是地震荷载作用下，桥梁结构的安全性备受关注。同时，震后的桥梁快速修复与交通畅通尤为重要。本文首先对灌浆套筒进行静力试验，得到了灌浆套筒的材料性能。在此基础上，采用数值模拟方法，保持墩柱纵向压力不变，对桥梁墩柱在横向静力荷载、地震荷载作用下进行弹塑性分析，并与现浇墩柱结果进行对比。在墩柱体外添加耗能装置后，研究了墩柱的破坏模式、滞回特性和延性性能。结果显示，耗能装置使得墩柱的耗能能力增强，桥墩底部的受力得到改善。外置耗能装置先于灌浆套筒和钢筋屈服，有效地保护桥墩内部构造，有利于桥墩结构稳定、持续的抵抗地震荷载。

【关键词】：灌浆套筒；耗能装置；墩柱；装配式桥墩；抗震性能

Application of Prefabricated Seel Bar Sleeve Grouting Connection Technology

Jicheng Zhang, Jianfeng Liu, Zefu Liu, Zhiyong Qiao, Rixin Wang

Xuzhou City Highway Business Development Center Jiangsu Xuzhou 221000

Abstract: The assembly concrete bridge pier connected by grouting sleeve has been applied in bridge engineering, and the safety and reliability of bridge structure under the lateral load, especially the earthquake load, have been paid more attention. At the same time, the rapid repair of the bridge after the earthquake and smooth traffic is particularly important. In this paper, the static test of grouting sleeve is carried out, and the material properties of grouting sleeve are achieved. On this basis, the elastoplastic analysis of bridge pier under lateral static load and seismic load is carried out by using numerical simulation method. The results are compared with those of cast-in-place pier. The failure mode, hysteretic characteristics and ductility of the pier column are studied considering the energy dissipation device added outside the pier column. The results show that the energy dissipation capacity of the pier is enhanced and the mechanical properties at the bottom of the pier is improved by adding energy dissipation devices. The energy dissipation device yields prior to the grouting sleeve and steel bar, and can effectively protect the internal structure of the bridge pier. For this reason, the bridge pier structure can maintain its stability and can continuously resist the seismic load.

Keywords: Grouting sleeve; Energy dissipating device; Pier column; Assembled pier; Aseismic performance

引言

采用灌浆套筒装配式钢筋混凝土桥梁，能够实现桥梁下部结构的现场拼装，减少现浇操作工作量，降低施工现场的粉尘和噪声污染，也避免了长时间的交通堵塞。快速预制拼装保证了构件装配的精度，有效地提高了施工安全性和成桥可靠性。

桥墩主要是承压构件，在正常使用情况下，灌浆套筒装配式桥墩与现浇桥墩并没有体现出很大的差别。但在横向力，尤其是地震力作用下，灌浆套筒装配式桥墩便成为关注的重点。Zachary B. Haber 等经静力试验研究发现，灌浆套筒连接装配式桥墩耗能能力弱于现浇桥墩，主要体现在位移延性偏低。Ameli 和 Pantelides 对缩尺桥墩模型进行了循环加载试验，他们重点关注灌浆钢套筒预埋位置对预制拼装桥墩的抗震性能影响，其结果表明，灌浆套筒预制拼装桥墩的延性性能与现浇桥墩接近。李田田对拼装墩和现浇墩进行了拟静力试验，结果显示灌浆钢套筒连接桥墩的耗能能力、残余变形和等效刚度与现浇桥墩区别不大，但承载力低于现浇桥墩。Xu 和 Pan 提出了一种塑性铰区用 ECC，灌浆套筒连接的预制钢筋 RC/ECC

组合墩，其试验结果表明，预制柱的延性和承载力均与现浇钢筋混凝土柱相近，预制墩柱具有较强的地震能量吸收能力和抗损伤破坏能力。

桥梁抗震主要依赖于桥梁下部结构的延性性能，而墩底的塑性铰是设计的关键。王志强等对灌浆套筒连接形式下的节段拼装桥墩进行了试验分析，通过循环加载试验，对桥墩延性、耗能、滞回、损伤残余变形进行了试件抗震性能分析。结果显示，采用灌浆套筒连接，桥墩结构的等效刚度增大，损伤残余变形减小，可以达到现浇整体桥墩抗震性能的效果，可以满足中高强度地震区域的抗震要求。柳承辉和胡云天采用修正的压力场模型和扰动应力场结构理论，建立预制装配桥墩数值模型，进行预制装配桥墩的拟静力数值模拟和动力分析，重点研究墩柱塑性铰局部区域，通过墩柱的滞回性能和捏缩特性，对比分析了现浇钢筋混凝土桥墩和预制装配桥墩在塑性铰区的抗震性能的差异。结果显示，采用灌浆套筒连接的预制装配桥墩具有良好的承载能力和延性，在墩底塑性铰区的抗震性能与常规现浇结构相当。

采用墩柱底部塑性铰抗震属于传统的抗震设计，已经广泛应用于桥梁工程之中，具有“大震不倒、中震可修”的特性，然而，震后桥梁的修复工作存在实际困难，甚至需要推倒重建。本文在传统灌浆套筒装配式钢筋混凝土墩柱设计基础上，在外壁附加耗能装置，这种新型连接结构能够在提高桥梁整体刚度的同时，还能起到耗散地震能量的作用。一方面可以在地震后快速更换墩底连接构件，以达到迅速恢复其使用功能的目的。另一方面，这种新型装配式桥墩建设效率高、绿色环保，可以很好地运用到装配式桥梁中去。

1 灌浆套筒材料试验

试验采用整体式全灌浆套筒，型号为GTZQ4-40，套筒材料为QT600，如表1所示。

表1 套筒材料性质

项目	性能指标
抗拉强度 R_m /MPa	≥ 600
屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	≥ 370
伸长 A/%	$\geq 3\%$
布氏硬度 HBW	190~270
弹性模量 E/GPa	172
泊松比	0.275

采用 HRB400 热轧带肋钢筋，如表 2 所示。

表2 钢筋力学性能参数

钢筋母材检验数据					
样品编号	1	2	3	平均值	标准值
钢筋直径 (mm)	40	40	40	--	--
屈服强度 (MPa)	441	443	442	442.00	≥ 400
抗拉强度 (MPa)	615	613	615	614.33	≥ 540

在灌浆过程中，可能存在灌浆料不密实的情况，导致构件节点连接处的强度降低。试验过程中，通过模拟灌浆套筒缺陷的方式，来研究套筒灌浆连接构件中灌浆缺陷对接头强度的影响程度。

考虑端部缺陷和中部缺陷，两种缺陷可归结为钢筋锚固长度的减少，试验中通过在钢筋上套 PVC 管进行模拟。在套筒内钢筋锚固段设置缺陷时，主要考虑钢筋锚固长度被分成两段时对试件强度的影响。当预制端钢筋锚固段缺陷和拼装端钢筋锚固段缺陷长度相等时，二者对试件强度的影响是相同的。端

部缺陷和中部缺陷模拟如图 1 所示。

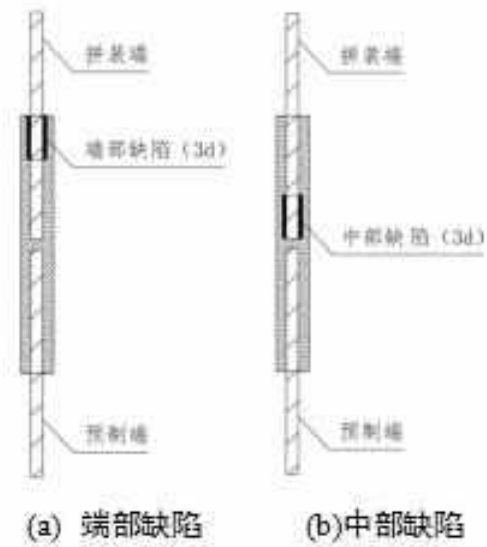


图1 灌浆套筒缺陷预制

试验工作中，采用 WAW 系列电液伺服万能试验机，图 2 为试验机加载系统，图 3 为数据采集系统。



图2 电液伺服万能试验机 图3 电液伺服万能试验机显示器

按照相关规范要求，单向拉伸试验的加载方式为：0 → 0.6 f_{yk} → 0（测量残余变形）→ 最大拉力（记录极限抗拉强度）→ 破坏（测定最大力下总伸长率）。试验结果见表 3 和图 4，这些试验数据将为数值模拟提供服务。

表3 试件强度对比

试样	屈服强度 (MPa)	屈服强度标准值 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	抗拉强度标准值 (MPa)	破坏模式
无缺陷	446		622		钢筋拉断
端部缺陷	442	≥ 400	609	$\geq 1.15 f_{yk}$	钢筋拉断
中部缺陷	442		563	(622)	钢筋拉断

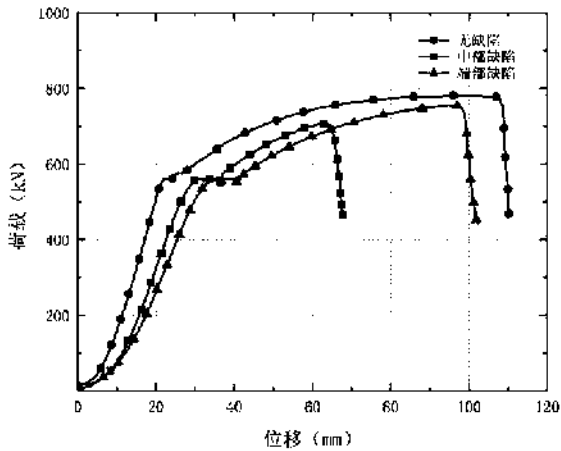


图4 单向拉伸试件荷载-位移曲线

2 有限元数值模型

按某实际工程预制拼装桥墩数据建模, 桥墩长×宽×高为 180cm×180cm×780cm, 采用 C40 混凝土; 承台长×宽×高为 280cm×280cm×220cm, 采用 C30 混凝土。墩柱与承台之间采用灌浆套筒连接, 连接钢筋采用直径为 40mm 的 HRB400 钢筋。进行结构分析时, 混凝土本构关系采用塑性损伤模型, 钢筋本构关系采用双折线模型。

桥墩和承台采用 C3D6R 和 C3D8R 单元, 纵筋和箍筋均采用 T3D2 单元, 桥墩和承台采用 Tie 连接, 承台底部固结。考虑结构自重和桥跨结构分配给桥墩的轴向压力, 现浇模型如图 5 所示。

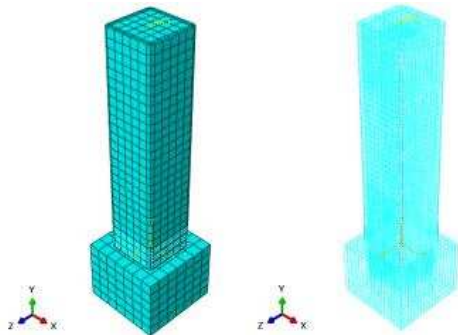


图5 现浇桥墩模型各组成部件

对于灌浆套筒连接模型, 需要分析灌浆套筒连接对装配式桥墩抗震性能的影响, 当套筒内钢筋断开时, 桥墩和承台之间采用硬接触, 摩擦系数取 0.5, 套筒采用嵌入的方式与灌浆料和桥墩进行连接, 灌浆料和桥墩采用共节点的方式进行耦合, 灌浆套筒和灌浆料的材料本构关系由上述试验获得, 其余与现浇模型相同, 几何模型如图 6 所示。

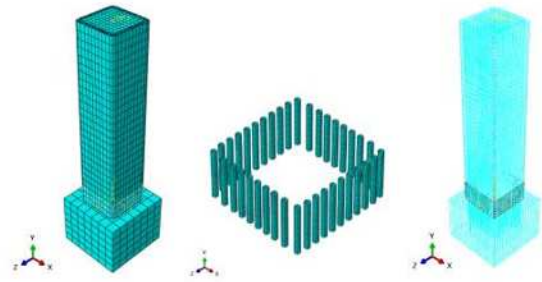


图6 灌浆套筒桥墩模型各组成部件

在灌浆套筒连接模型的基础上, 安装外置耗能装置, 以分析添加耗能装置对灌浆套筒连接装配式桥墩抗震性能的改善效果, 期望通过这种方式可以增大桥墩和承台之间的联系, 并通过耗能装置提前屈服起到保护桥墩的效果。耗能装置一端固定在承台上, 一端固定在桥墩侧面, 采用轴向连接器进行模拟, 所设计耗能装置的布置方式如图 7 所示。

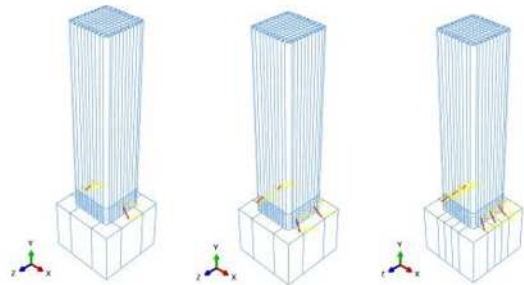


图7 灌浆套筒桥墩耗能装置布置方式

考虑到计算收敛效率, 对模型进行了适当的简化, 未考虑钢筋和混凝土之间的粘结滑移对计算结果的影响, 网格尺寸和形状等也做了适当的处理, 在不影响结果正确性和精度的基础上, 方便数据的提取。

3 桥墩静力分析

3.1 墩顶荷载-位移

保持墩顶轴向压力不变, 让横向荷载逐渐增加, 使得墩柱从弹性变形阶段过渡到弹塑性变形, 直至最终破坏。

现浇墩柱、灌浆套筒连接墩柱, 两墩柱都经历了弹性变形阶段、受拉区边缘破坏、塑性变形阶段, 最终达到各自的极限荷载。灌浆套筒连接墩柱的极限承载能力比现浇墩柱高出 9.35%, 但灌浆套筒连接墩柱的横向极限位移要小于现浇墩柱的横向极限位移。在弹性阶段, 两者基本吻合, 由于此阶段钢筋的刚度大, 并且灌浆料基本不出现滑移, 构件弹性阶段的荷载-位移曲线与钢筋的本构关系趋于一致。但随着荷载位移的增加, 灌浆套筒连接墩柱承载能力显示出其优势。经计算灌浆套筒墩柱的位移延性系数为 3.2, 大于规范最小值 2.86, 满足工程安全性要求。而现浇墩柱的位移延性系数为 5.8, 其延性性能更好。

3.2 套筒数量对构件荷载位移曲线的影响

对于灌浆套筒连接墩柱，改变套筒的数量，对最大位移和承载力的影响见表4。

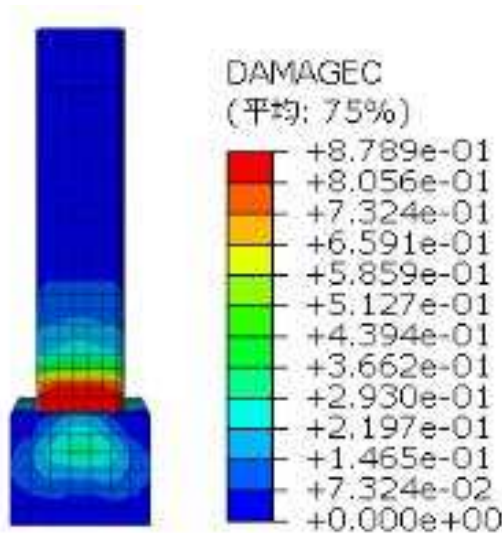
表4 最大位移/承载力表

灌浆套筒数量	18	28	38
最大位移 (mm)	54	150	170
最大承载力 (kN)	2252	2833	2833

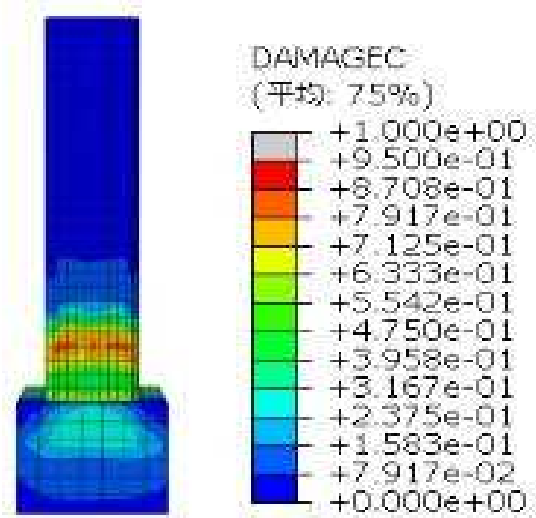
在极限承载能力方面，套筒数目过少，会对套筒连接墩柱最大承载能力有较大影响。但是随着套筒数目的增加，承载能力不会线性增加，28个套筒的最大承载能力和38个套筒的最大承载能力相同。说明此时墩柱的最大承载能力决定因素已经不是套筒数量，而是抗拉钢筋和受压区的混凝土。考虑最大位移时，套筒数量过少，墩柱的最大位移量迅速降低。当套筒数目从18增大到28的时候，最大承载力增大了23%，最大位移增大了177%，从28增大到38的时候，最大承载力并没有增大，而最大位移增大了13%，因此，当套筒数量增加到28的时候，不宜继续增加套筒数量。一方面，增多套筒数量不会再继续增大截面承载能力，在增加最大位移量上效果不明显。另一方面，继续增多套筒数量可能引起更多的应力集中，进而削弱构件承载能力。

3.3 损伤演化

DAMAGE云图反映了混凝土的受压破损程度，损伤值为0，表示材料完好无缺；损伤值越大，表示材料受损程度越严重；损伤值为1，表示材料破坏。



(a) 现浇墩柱



(b) 套筒连接墩柱

图8 极限位移情况下压缩损伤分布

由图8可见，极限位移情况下，现浇墩柱损伤最大值为0.88，混凝土尚未破坏，而套筒连接墩柱损伤最大值达到1.0，有局部发生破坏。实际上，现浇墩柱的损伤最大值在墩底，破坏从这里开始向上延伸。而套筒连接墩柱，由于在墩柱和承台之间增加了套筒（弹塑性材料），最大损伤已经向上转移了。

4 抗震性能研究

4.1 滞回特性

作为评价结构基本抗震性能的重要指标，荷载一位移滞回曲线能够反映结构的吸能性质和破坏机制，如图9所示。

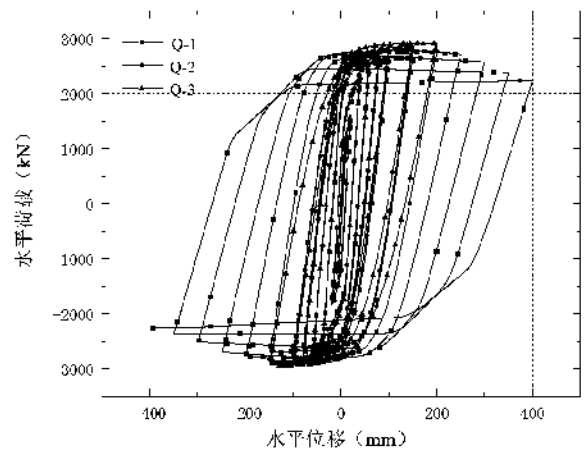
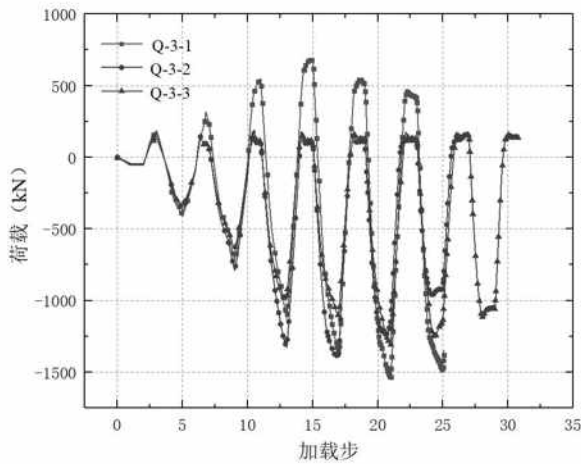


图9 三种不同类型墩柱滞回曲线

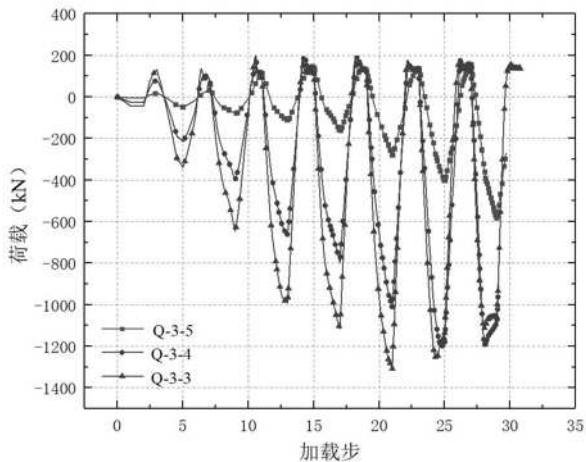
图9中，Q-1表示现浇墩柱，Q-2表示普通套筒连接墩柱，Q-3表示含有耗能装置的套筒连接墩柱。经比较发现，三种墩柱的滞回曲线大致呈菱形，表现出结构耗能能力良好。从图中可以看出灌浆套筒连接墩柱和外加耗能装置灌浆套筒连接墩柱的滞回环面积类似，说明这两种结构的耗能能力类似，有相

近的力学性能。与现浇墩柱比较，普通灌浆套筒连接墩柱和外加耗能装置灌浆套筒连接墩柱的滞回环面积更大，耗能能力更大，这是由于灌浆套筒和外加的耗能装置对桥墩底部的受力有改善作用。同时，由于灌浆套筒连接墩柱和承台之间的联系比现浇墩柱弱，所以在达到极限承载力后，其受力性能比现浇墩柱的受力性能变化更大，更容易发生脆性破坏。

不同数量和刚度的耗能装置连接器在反复循环荷载作用下，其受力如图 10 所示，从图中可以看出，耗能装置在灌浆套筒连接装配式桥墩的受力过程中可以发挥一定的作用，并且耗能装置的刚度越大，所能承受的外荷载越大，耗能装置的数量越多，受力越均匀。另外，从图中可以看出，在保证耗能装置足够刚度前提下，耗能装置的极限承载力达到 1500kN 以上，会有更好的安全性，发挥出最佳的耗能效果。



(a) 改变耗能装置数量



(b) 改变耗能装置刚度

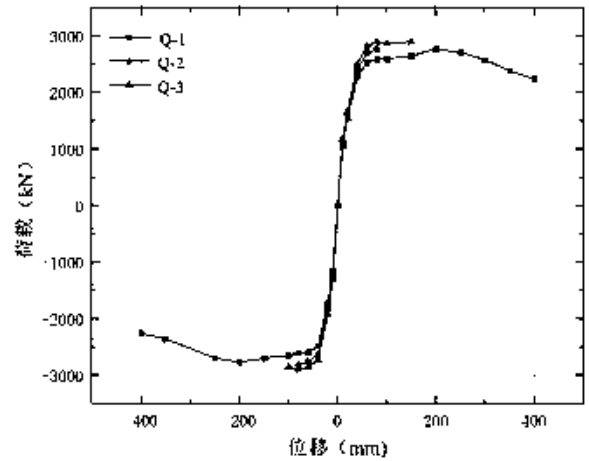
图 10 耗能装置受力情况

图 10 中 Q-3-1 表示一对耗能装置，其刚度为最强值。Q-3-2 表示两对耗能装置，其刚度为最强值。Q-3-3 表示三对耗能装置，其刚度为最强值。Q-3-4 表示三对耗能装置，其刚度为中

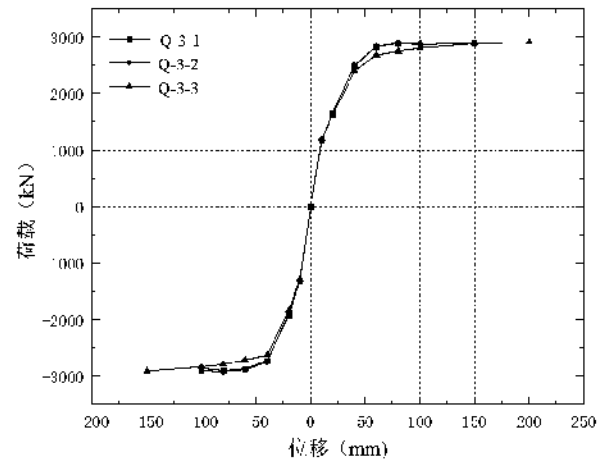
强值。Q-3-5 表示三对耗能装置，其刚度为最弱值。

4.2 骨架曲线

骨架曲线由各级滞回环的峰值点连接而成，是滞回曲线的包络图，直观反映了构件的荷载和位移情况。图 11 为三种不同连接方式墩柱的骨架曲线对比图。



(a) 不同连接方式桥墩骨架曲线



(b) 不同数量耗能装置桥墩骨架曲线

图 11 不同类型桥墩骨架曲线对比图

从图 (a) 中可以看出，相比传统现浇桥墩 Q-1，Q-2 和 Q-3 墩柱的骨架曲线在弹性阶段的斜率较大，并且 Q-3 墩柱骨架曲线在弹性阶段的斜率大于 Q-2，这是因为灌浆套筒和耗能装置初始弹性刚度较大，提高了整个墩柱的初始弹性刚度。当位移加载到 15mm 时，耗能装置开始屈服，当位移加载到 40mm 时，灌浆套筒开始屈服。随着加载的增加，骨架曲线出现峰值点。Q-2 墩柱的极限承载力比 Q-1 桥墩大，Q-3 墩柱比 Q-2 墩柱又有明显的提高，说明装配式桥墩中的灌浆套筒可以起到提高墩柱极限承载力的作用。墩柱外置耗能装置的添加进一步提高了装配式桥墩的极限承载力，并且外置耗能装置可以先于灌浆套筒和钢筋屈服，保护了桥墩内部构造，有利于桥墩结构持

续、稳定的耗能。

从图(b)中可以看出, Q-3-3墩柱的骨架曲线在弹性阶段的斜率最大, 其次是Q-3-2墩柱, Q-3-1墩柱的骨架曲线在弹性阶段的斜率最小, 这是因为耗能装置的数目越多, 初始弹性刚度越大, 提高了墩柱初始弹性刚度。Q-3-2墩柱的承载力高于Q-3-1墩柱, 虽然Q-3-3墩柱的承载力有所下降, 但极限位移增大比较明显。说明装配式桥墩中外加耗能装置的数量对桥墩极限承载力的提高具有较大的影响, 耗能装置的数量越多, 越有利于桥墩的受力。

5 结语

(1) 考虑灌浆套筒无缺陷、有端部缺陷、有中部缺陷三种情况, 能够模拟现场施工因操作人员和设备变化引起的不足。结果显示, 不论有无缺陷, 套筒破坏时都是钢筋拉断。有缺陷情况下, 套筒的屈服强度有微弱的下降, 但大于屈服强度标准值, 满足工程要求。因此, 只要保持灌浆套筒的工作状态

处于弹性阶段, 允许套筒存在一定的施工缺陷。

(2) 采用灌浆套筒将墩柱与承台连接, 套筒的数量太少, 承载能力和变形能力不足。随着套筒数量增加, 承载能力和变形能力逐步增加, 但并不是越多越好, 存在一个最佳值。当套筒数量达到最佳值时, 承载能力和变形能力双双实现最大化。在此基础上继续增加套筒数量, 不会继续增大截面承载能力, 最大位移量的增加也不明显。同时, 继续增多套筒数量可能引起更多的应力集中, 进而削弱构件承载能力。

(3) 在墩柱体外增加耗能装置后, 墩柱的滞回环面积增大, 耗能能力更强, 也对桥墩底部的受力状态有明显的改善, 提高了桥梁的抗震性能。同时, 增加了耗能装置, 能够有效地提高墩柱的刚度, 提高桥墩抵抗侧向变形的能力。由于外置耗能装置先于灌浆套筒和钢筋屈服, 能够有效地保护桥墩内部构造, 有利于桥墩结构持续、稳定的耗能。地震过后, 能够方便快捷地维修或更换外置耗能装置, 迅速恢复桥梁的使用功能, 恢复正常的交通秩序。

参考文献:

- [1] 李嘉维,夏樟华,余舟扬.灌浆套筒连接装配式混凝土双柱墩的双向拟静力试验研究[J].地震工程与工程振动,2020,Vol.40,(3):193-203.
- [2] Bijan Khaleghi, Eric Schultz, Stephen Seguirant, et al. Accelerated bridge construction in Washington State: from research to practice[J].PCI Journal,2012,34-49.
- [3] 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.
- [4] Xu L, Pan J, Cai J. Seismic performance of precast RC and RC/ECC composite columns with grouted sleeve connections[J]. Engineering Structures, 2019, 188: 104- 110.
- [5] 王志强,卫张震,魏红一.预制拼装联接件形式对桥墩抗震性能的影响[J].中国公路学报,2017,30(5):44-45.
- [6] 柳承辉.胡云天.预制装配桥墩塑性铰区的抗震性能研究[J].公路,2021(12):129-132.

作者简介: 王日鑫, 男, 1987年出生, 山西朔州人, 中国建筑第七工程局有限公司工程师, 研究方向: 桥梁工程。