

# 采用榫卯剪力键的预应力装配式双柱桥墩 拟静力分析

包龙生<sup>1</sup>,王贺鑫<sup>1</sup>,汤维维<sup>2</sup>,张远宝<sup>1</sup>,于玲<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学建筑设计研究院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 探究地震的作用下预应力钢筋混凝土装配式双柱桥墩的力学性能及影响因素,分析钢筋混凝土双柱式桥墩的节点破坏机理. 方法 基于 ABAQUS 有限元软件进行装配式双柱桥墩结构的非线性数值模拟,分别依托实际工程设计整体现浇模型和采用剪力键的装配式双柱桥墩模型,研究结构在低周往复位移荷载作用下的抗震性能和桥墩节点处的破坏形式. 结果 预应力双柱墩与现浇模型破坏接近,破坏的损伤均集中在桥墩塑性铰处,现浇墩极限荷载为 212.9 kN,预应力双柱墩极限荷载为 245.1 kN,但预应力钢筋在混凝土达到屈服后,拥有较好的自复位性能,减小残余位移;榫卯剪力键较好地阻止了在荷载作用下的剪切滑移,使桥墩在受力方面存在冗余度和足够的抗侧刚度. 结论 榫卯剪力键可以提高装配式双柱桥墩的承载能力和整体性能,对装配式双柱桥墩的工程应用提供参考.

**关键词** 抗震性能;双柱式桥墩;拟静力方法;预应力节段拼装;剪力键;参数分析

中图分类号 TU279.2<sup>+</sup>2;U445.4

文献标志码 A

## Pseudo Static Analysis of Assembly Type Double Column Pier Based on ABAQUS

BAO Longsheng<sup>1</sup>, WANG Hexin<sup>1</sup>, TANG Weiwei<sup>2</sup>, ZHANG Yuanbao<sup>1</sup>, YU Ling<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Institute of Architectural Design, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The purpose of this paper is to investigate the mechanical properties and influencing factors of prestressed reinforced concrete prefabricated double column piers under the action of earthquake, and to analyze the joint failure mechanism of reinforced concrete double column piers. Based on ABAQUS finite element software, the nonlinear numerical simulation of double column pier structure is carried out. Based on the actual engineering design of cast-in-place model and as-

收稿日期:2017-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51078242);辽宁省自然科学基金项目(201602602);住房和城乡建设部科学技术项目(2016-K2-012);沈阳市科学技术基金项目(F16-095-1-00)

作者简介:包龙生(1971—),男,教授,博士,主要从事桥梁工程结构方面研究.

sembled by shear bond double column pier model of structure under low cycle to failure reset under load,the seismic performance of shift and the pier joints. Prestressed double column pier and cast-in-place failure model close to failure damage are concentrated in the plastic hinge at the pier, the pier cast-in-place ultimate load is 212.9 kN,the prestressed double column pier ultimate load is 245.1 kN,but the prestressed steel bar in concrete yield,with self reset good performance and reduce the residual displacement. The tenon and mortise shear key can prevent the shear slip under the action of load,and make the pier have redundant force and enough lateral stiffness in the force. The mortise and tenon shear key can improve the bearing capacity of the assembled double column pier and overall performance of the model,which can provide reference for the engineering application of the prefabricated double column pier.

**Key words:** seismic performance;double column pier;pseudo static method;prestress segment assembly;shear key;parameter analysis

预制装配式桥梁现已成为加快生态文明建设、推动新型工业化发展、建成绿色城市的重要技术,装配整体式预应力混凝土结构具有预制标准化、施工高效、模数化、现场湿作业少等优点<sup>[1-4]</sup>. 加大预制装配式桥梁发展推进力度,对推动城市基础设施施工方式变革、减少污染物和废弃物排放、提高劳动生产率、建筑行业工业化的可持续发展具有重大意义.

目前国外有关学者在抗震性能方面对装配式桥梁结构进行大量相关研究,国内方面对整体装配式桥梁结构研究较少,尤其是下部结构局限于单柱式桥墩. 新西兰 Canterbury 大学的 Palermo 和 Pampanin<sup>[5-6]</sup>制作 5 个 1:3 缩尺试件进行低周反复荷载试验,在塑性铰区域设置耗能钢筋验证桥墩自复位性能以及设计施工的可行性;刘少乾等<sup>[7]</sup>研究碳纤维自密实材料制作的混凝土桥墩对抗震性能的影响,通过建立模型数值模拟为计算提供理论依据;黄宜等<sup>[8]</sup>对装配式单柱墩进行拟静力试验,制作 4 组桥墩试件研究了不同连接形式的单柱式桥墩各项抗震性能指标. 在国内的桥梁施工建设中,整体装配式结构已广泛应用在桥梁上部结构的建造中,而整体装配式桥墩的实际应用就相对有限. 限制推广的主要原因之一就是预应力节段装配式桥墩的节点及整体抗震性能缺乏较为系统的研究,在对装配式桥梁抗震设计时无规范

可循<sup>[9-12]</sup>. 基于此,笔者以沈阳市中央大街跨浑河特大桥工程为背景,设计采用榫卯剪力键装配式预应力双柱桥墩,建立 ABAQUS 有限元模型,通过理论分析桥墩在低周往复加载下的破坏形式以及在软件模拟过程中榫卯剪力键部位的受力特点,为预应力装配式双柱桥墩抗震性能试验做前期理论研究.

# 1 装配式桥墩模型

## 1.1 桥墩抗震试验方案

桥墩的抗震性能试验采用拟静力试验方法<sup>[13-14]</sup>,是目前国内外在结构或构件抗震性能研究中使用较为广泛的研究方法. 加载装置如图 1 所示.

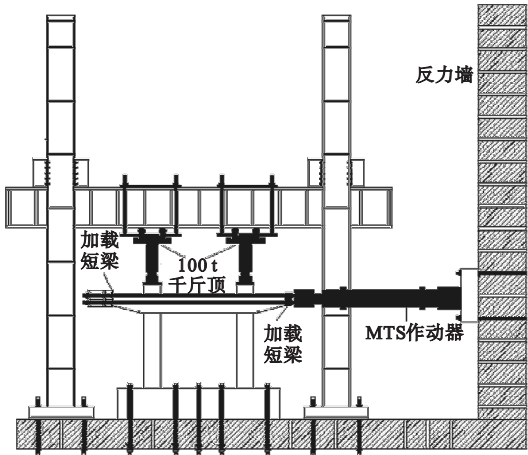


图 1 加载装置及构件仪器布置

Fig. 1 Arrangement of loading device and component

拟静力采用荷载控制或位移控制对桥墩模型进行规律性的往复加载,使桥墩模型从弹性阶段直至破坏.采用拟静力加载试验可以最大限度地利用试验构件提供各种抗震分析所需的参数,例如:滞回曲线、承载能力、变形能力、极限位移、累积耗能和损伤特征等.笔者进行装配式桥墩拟静力试验的目的是对桥墩在反复荷载作用下的性能进行深入地研究,从而揭发桥墩的破坏机制,把握桥墩的抗震性能.

1.2 桥墩模型设计制作

笔者设计模型以沈阳市中央大街跨浑河桥工程项目为依托,桥墩试件按照实际桥墩尺寸的 1/4 缩尺比设计、制作了 5 类装配式双柱墩模型,分别为整体现浇桥墩试件,节点处采用钢套筒连接形式的装配式桥墩试件,采用金属波纹管连接形式的装配式桥墩试件,单节段预应力连接的装配式桥墩试件,多节段预应力连接的装配式桥墩试件.笔者仅研究优化的多节段预应力连接装配式桥墩试件与整体现浇双柱桥墩研究,模型相似比参

数如表 1 所示.

表 1 桥墩模型相似关系

Table 1 Similarity relation of pier models		
物理参数	相似常数	备注
长度	0.250 00	控制尺寸
应变	1.000 00	控制材料
等效弹性模量	1.000 00	控制材料
等效应力	1.000 00	控制材料
质量密度	2.000 00	控制材料
质量	0.031 25	控制材料
集中力	0.062 50	控制荷载
线荷载	0.250 00	控制荷载
面荷载	1.000 00	控制荷载
力矩	0.015 63	控制荷载

注:缩尺比为  $S_1=1/4$ .

整体现浇桥墩试件其构造与配筋如图 2 所示,其详细设计参数如下:

①墩身配有 8 根直径为 18 mm 的纵筋,钢筋在墩底以及盖梁和桥墩连接处箍筋加密;

②盖梁采用 C50 混凝土,墩身采用 C40 混凝土,承台采用 C30 混凝土,普通钢筋采用 HRB400 级钢筋.

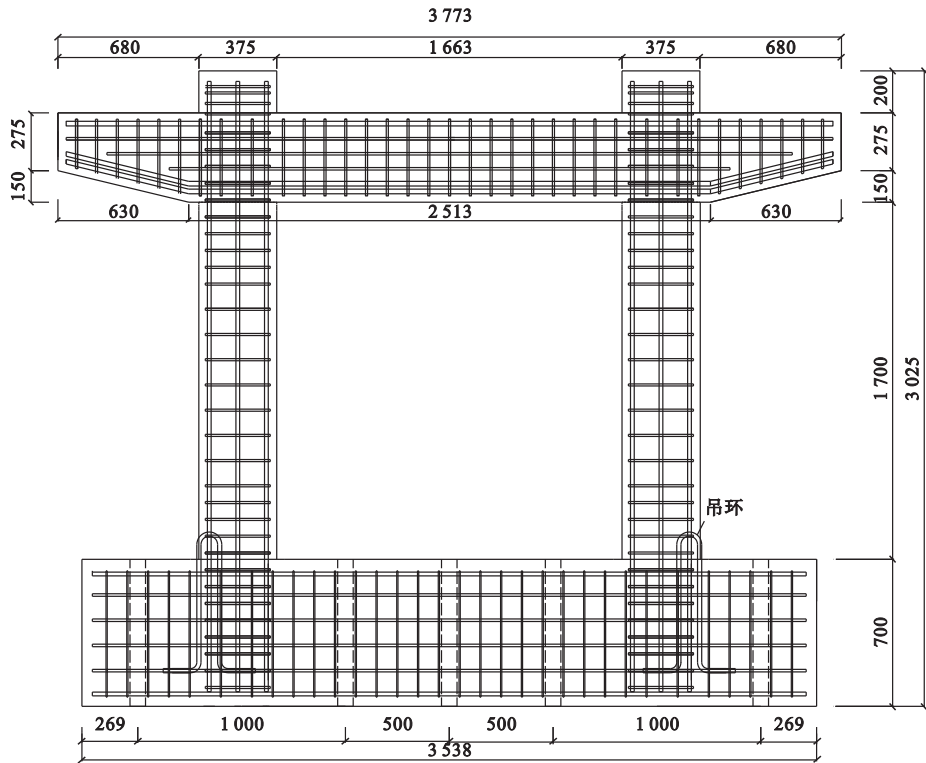


图 2 整体现浇模型立面构造及截面配筋

Fig. 2 Overall cast model, facade structure and section reinforcement

在地震设计<sup>[15-16]</sup>状况下,装配式桥墩受压时底部水平接缝的剪力包括构件摩擦抗剪和钢筋销栓抗剪. 预应力装配式节段桥墩的设计考虑到桥墩水平接缝的受剪承载力,通过改变桥墩节段构造,在几何形式上设计榫卯结构的剪力键以减弱接缝间的相对滑动.

装配式预应力节段双柱桥墩的构造与配筋如图3~图6所示,详细设计参数如下:

①装配式节段桥墩几何尺寸和材料属性

均与整体现浇相同,除底座为张拉预应力钢绞线设计贯通的矩形凹槽;

②墩身配有8根直径为12 mm的纵筋,4根直径为18 mm 耗能钢筋以及贯穿盖梁、桥墩和承台的直径15.2 预应力钢绞线;

③耗能钢筋采用钢套筒灌浆连接,节段部位设置箍筋加密区,节段设置截面长×宽为200 mm×200 mm,高100 mm 的榫卯剪力键.

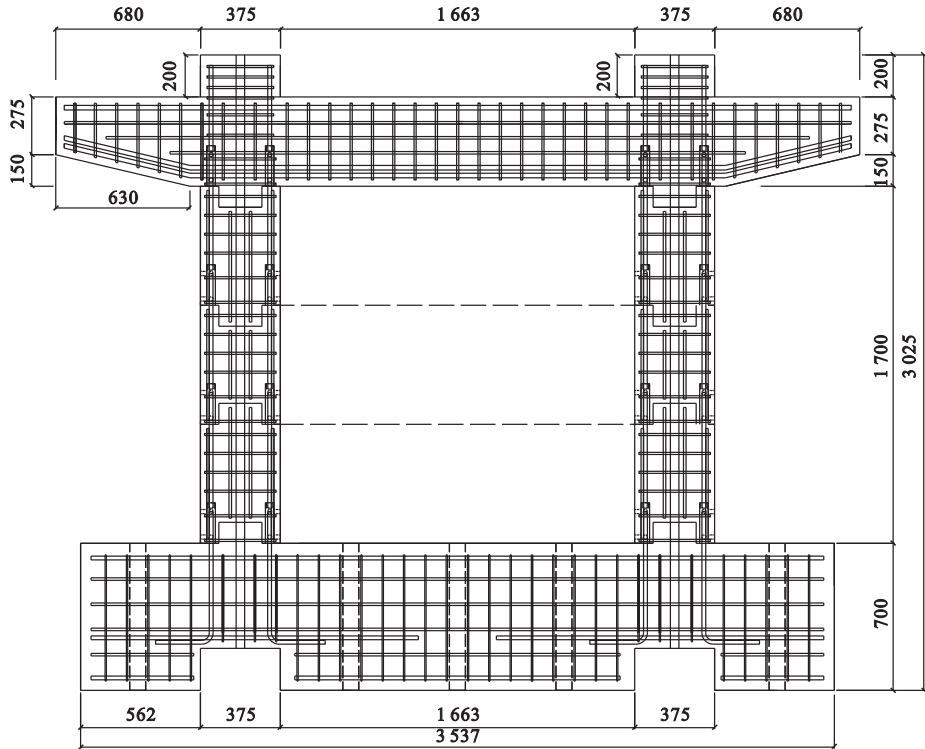


图3 节段预应力模型立面构造及截面配筋

Fig. 3 Elevation structure and section reinforcement of sectional prestress model

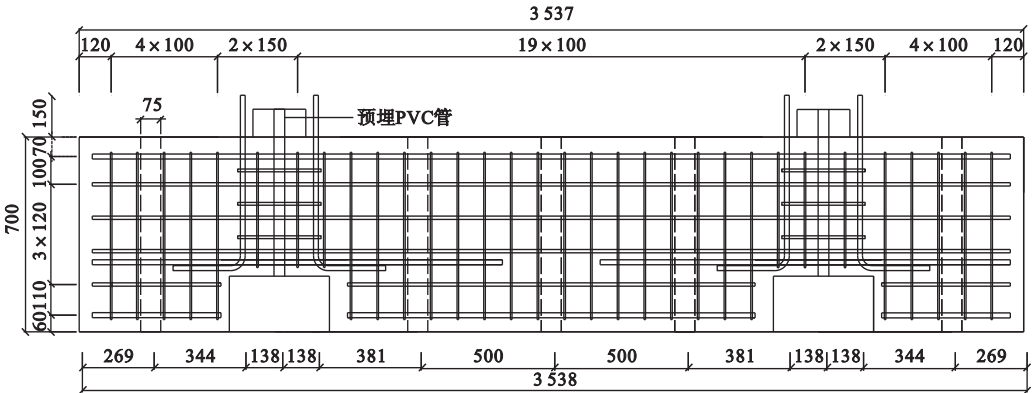


图4 承台立面构造及截面配筋

Fig. 4 Elevation structure and section reinforcement of the cap





$$\sigma_{\text{true}} = \frac{F}{A} = \sigma_{\text{nom}} (1 + \varepsilon_{\text{nom}}). \tag{6}$$

根据上述公式以及混凝土材料的性质,计算可知构件在塑性阶段之后,模型的应力应变曲线的参数.

普通钢筋采用 T3D2 单元模拟,预应力钢筋采用桁架单元,形成钢筋骨架嵌入到混凝土中从而避免两者不同材料之间的相对滑移. 钢筋离散建模嵌入混凝土构件中形成“钢筋笼”,如图 7 所示.

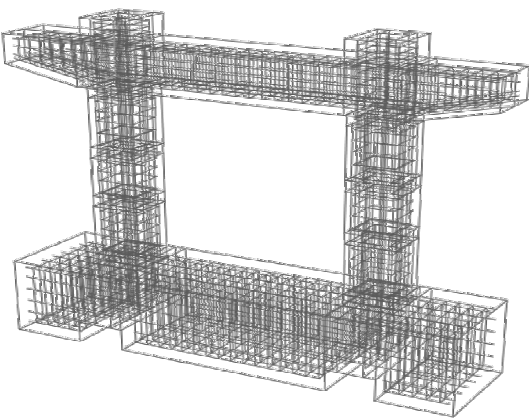


图 7 节段预应力实体模型中的“钢筋笼”

Fig. 7 The steel cage in the prestressed solid model

桥墩模型采用往复加载进行弹塑性分析,钢筋将出现较为明显的包辛格效应. 滞回曲线与包辛格效应存在相互影响,其中钢筋的强度等级越高所产生的效应越强,计算的滞回曲线耗能能力越强. 在大量试验的基础上结合有关数据,提出钢筋本构模型(见图 8).

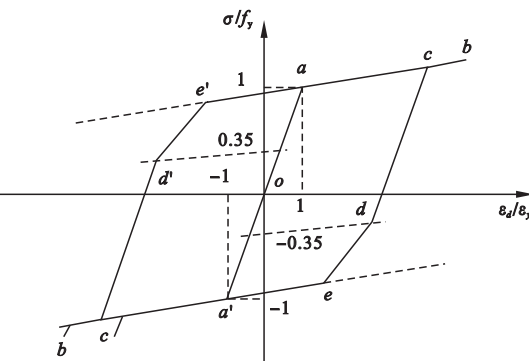


图 8 钢筋往复加载应力 - 应变曲线

Fig. 8 Stress strain curve of steel bar under reciprocating loading

由图 8 可知,加载时钢材在弹性阶段范围内不需考虑产生的包辛格效应,经过弹性阶段直至塑性阶段时要考虑此影响,对加卸载过程中软化阶段( $de$ 、 $d'e'$ 段)的模量由式(7)计算.

$$E'_s = K_s E_s = \begin{cases} (f_y - |\sigma_d|)(\varepsilon_y - |\varepsilon_d|), & \varepsilon_y \leq |\varepsilon_d| < 6.11\varepsilon_y, \\ 0.1E_s, & |\varepsilon_d| \geq 6.11\varepsilon_y. \end{cases} \tag{7}$$

式中: $\sigma_d$  为软化阶段初始点  $d$ 、 $d'$  时的钢材应力; $\varepsilon_d$  为软化阶段初始点  $d$ 、 $d'$  时的钢材应变; $f_y$  为钢材屈服强度, $\varepsilon_y$  为钢材的屈服应变.

装配式双柱桥墩采用预应力节段拼装技术,接缝处是装配桥墩的重要部位,预应力钢绞线为节段间的连接起到关键作用. 模型构件在外部荷载作用前存在初始位移,因此设置初始分析步、模型自重和施加的预应力、外荷载的施加. 预应力钢绞线一端在盖梁顶部进行张拉,另一端在设置的承台底部凹槽中锚固. 预应力的施加采用降温法,在材料属性中通过线膨胀系数计算预应力筋降温值.

节段之间考虑到实际构件中的相互作用以及接触的非线性问题,采用面面接触模拟,主表面与从表面存在切向摩擦和法向摩擦. 接触面的开合会引起接触状态的突变,而法向行为的接触压力和表面相对滑动摩擦力可以很好解决分析所带来的收敛问题. 设置混凝土摩擦系数为 0.5,在装配式桥墩截面互相接触时全截面受压.

3 有限元计算结果分析

3.1 变形和破坏形式

为了更好地研究塑性铰的变化规律,PC-1 是对比试验模型,PC-2 是预应力装配式模型,通过位移加载幅值对桥墩破坏产生的影响,根据桥墩的耗能变化特点,研究预应力装配式混凝土桥墩的破坏机理,模型加载主要参数如表 2 所示.

表2 试验组的加载方案

Table 2 Loading scheme of test group

试件组	接缝类型	预应力钢筋	位移加载制度	加载时间/s
PC-1	现浇无接缝	—	幅值从0到120 mm 逐级递增加载	0~144
PC-2	榫卯剪力键	15.2-1860-GB/T	幅值从0到120 mm 逐级递增加载	0~144

在不同的推覆模拟试验中进行了比较, 图9、图10所示。  
其在控制荷载下, 损伤参量云图的场分布如

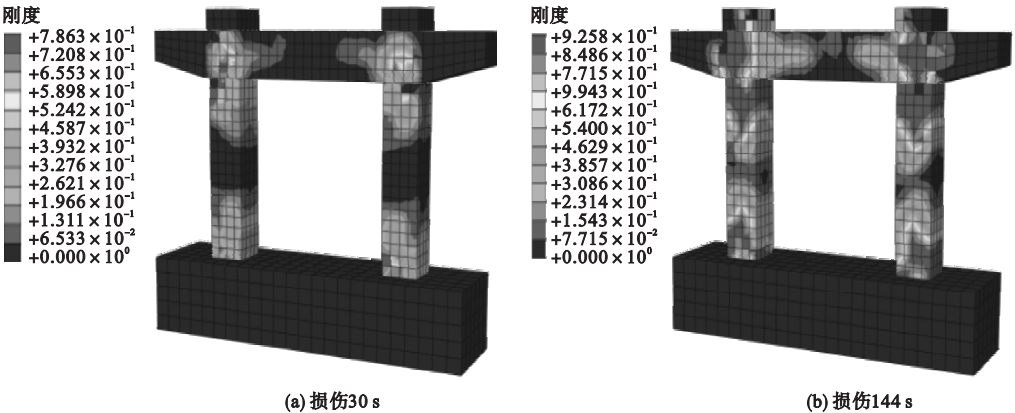


图9 现浇模型受压损伤参量图

Fig. 9 Damage parameter of cast-in-situ model under compression damage

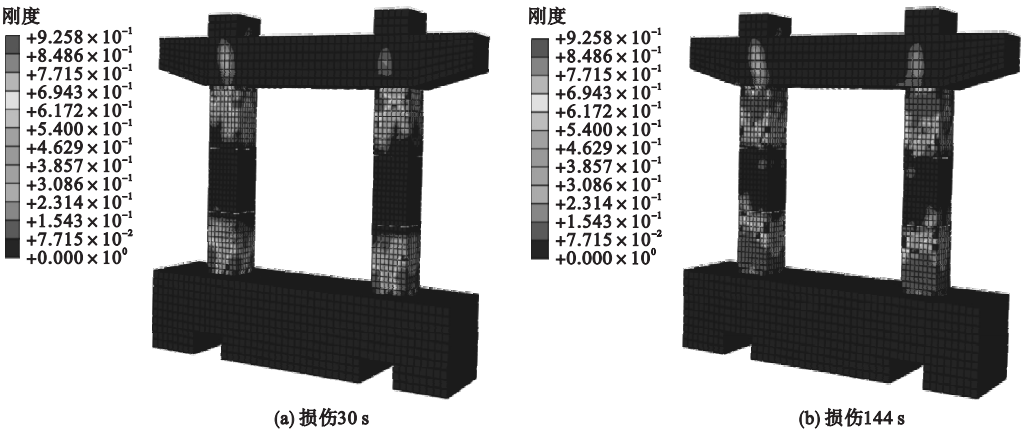


图10 装配式模型受压损伤30s参量图

Fig. 10 Damage parameter of assembly model under compression damage

整体现浇桥墩试件作为基准试件,构造桥墩的弯曲性能可假设为理想的弹塑性模型,延性是结构在承载能力无明显减小的条件下承受变形的能力,延性和塑性铰的长度存在联系,在反复力的作用下,墩身产生转动,致使产生转动的弯矩达到弹性弯矩的极限时,转动超过弹性进入了弹塑性,可认为此处形成了塑性铰。

Damage - c 和 Damage - t 值的变化和混凝土损伤因子的取值有关,在 ABAQUS 的隐式计算中,模型的截面处达到最大损伤参量值时,则不再提升,可认为此处截面所承载的弯矩达到它所能抵抗的极限弯矩,截面曲率也达到极限曲率,故此用混凝土的损伤参量来判断塑性铰的变化情况。

现浇模型受压损伤的初始破坏开始于柱

底以及墩柱与盖梁连接处,损伤值主要集中在构件的连接部位,装配式桥墩与现浇相比混凝土的最终破坏损伤参量差别不大,损伤参量云图的场分布如图 11、图 12 所示。

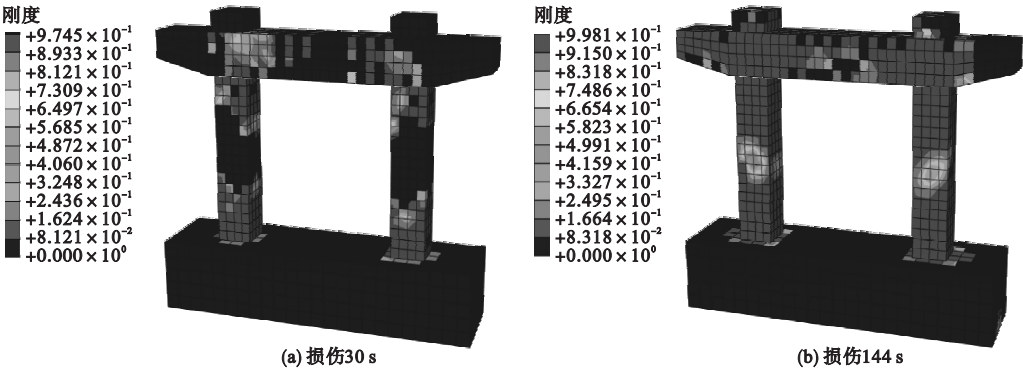


图 11 现浇模型受拉损伤参量图

Fig. 11 Parameter diagram of cast-in-place model under tensile damage

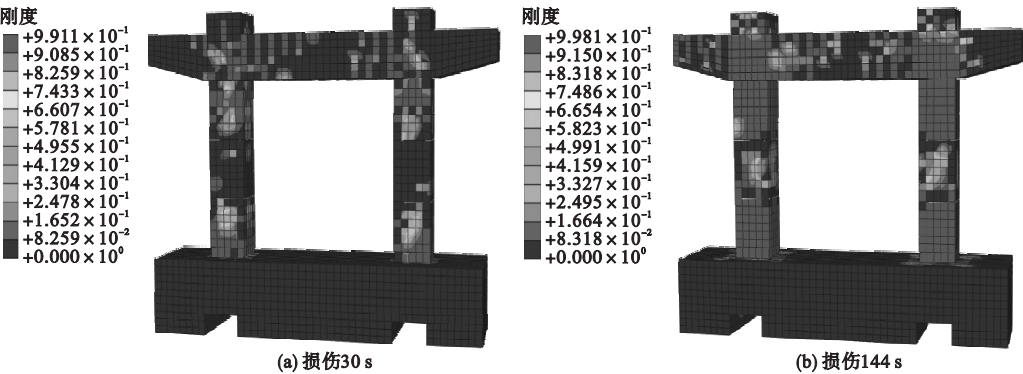


图 12 装配式模型受拉损伤参量图

Fig. 12 Parameter diagrams of tensile damage in an assembly model

由图可知,在往复荷载作用下破坏集中在两塑性铰区域,不同于单柱桥墩的破坏,双柱墩在地震力的作用下产生轴动力,进而影响到构件的屈服强度,轴力的差异会使桥墩塑性铰的长度有所差别。预应力节段桥墩与现浇受拉破坏相似,预应力钢筋是在混凝土达到屈服后,拥有较好的自复位性能,减小残余位移。受拉破坏的损伤均集中在桥墩塑性铰处,直至剥落破坏。

由于应力集中引起率先损伤,并导致墩柱内力的重分布,成为主要耗能点,致使墩柱塑性变形程度进一步增加,整体的抗震性能大幅度降低。采用预应力钢筋,截面刚度与两肢段接近,在反复推拉过程中可近似于三角形结构,稳定性高;而变截面处由于应力的集中,则会率先发生破坏,钢筋骨架的受力分布如图 13、图 14 所示。

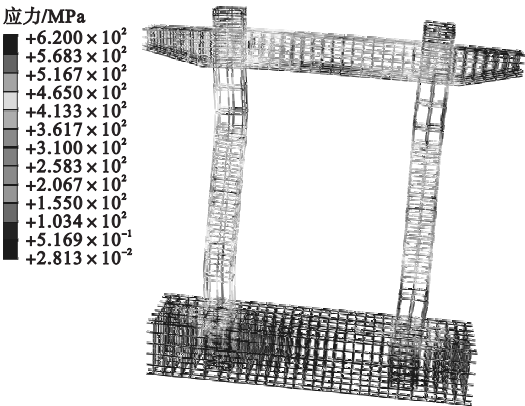


图 13 现浇模型钢筋骨架 Mises 应力图

Fig. 13 Cast-in-place model steel skeleton Mises stress diagram



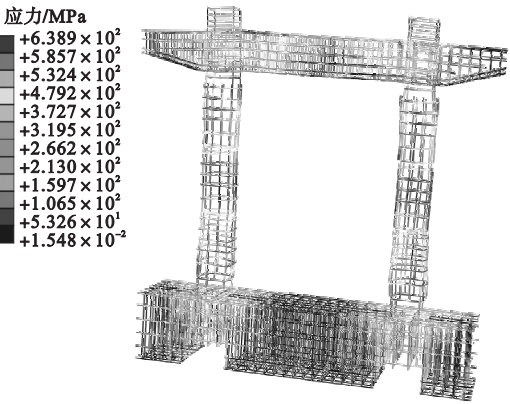


图 14 装配式模型钢筋骨架 Mises 应力图

Fig. 14 Assembly model steel skeleton Mises stress diagram

通过损伤云图分析榫卯剪力键的受力情况,节段间的剪力键较好地阻止了在荷载作用下的剪切滑移,使桥墩在受力方面存在冗余度和足够的抗侧刚度,保证在水平荷载作用下的变形不会带来重力二阶效应,提高了整个结构的承载能力.从图中分析,剪力键接缝张开宽度随位移的增加而逐渐变大,设计构造的榫卯剪力键装置有效地保证了榫头位置的受力情况使混凝土的损伤程度减小.

通过塑性铰的产生分析桥墩损伤破坏的规律:

(1)通过对比上图,现浇试件在初始时顶端产生初始损伤,随后底端和顶部开始出现塑性铰,之后损伤沿底端区域发展直至形成贯通损伤区域;预应力节段试件塑性铰的产生顺序和现浇试件相同.

(2)现浇与装配式预应力模型塑性变形情况接近,参照每组试件的受拉与受压,不同的加载形式并不能影响塑性铰产生顺序,但会影响塑性铰变化的快慢,逐级递减的幅值加载方案影响了塑性铰的变化快慢.

(3)现浇与装配式预应力试件的初始损伤均发生在顶端及底端,可看做是轴压力的作用引起的.在构件变形时,塑性铰优先产生于底端,继而往上发展直至完全破坏,塑性铰发育的速率明显的增加.

3.2 荷载-位移滞回特征

弹塑性阶段之后,结构体系进入塑性阶段不可恢复,且结构体系有着稳定变化范围的阻尼比,因此结构体系的破坏能量可用结构的滞回耗能来表示<sup>[18-20]</sup>.数值模拟得到的2组试件荷载与墩顶水平位移的滞回曲线如图15、图16所示.图中 $D$ 为墩顶位移, $F$ 为水平荷载.

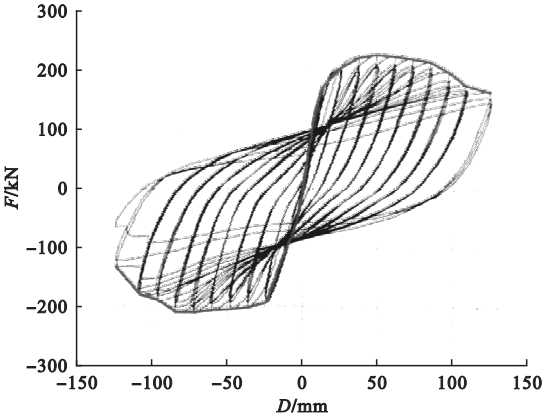


图 15 现浇试件滞回曲线图

Fig. 15 Hysteretic curve of cast in place specimen

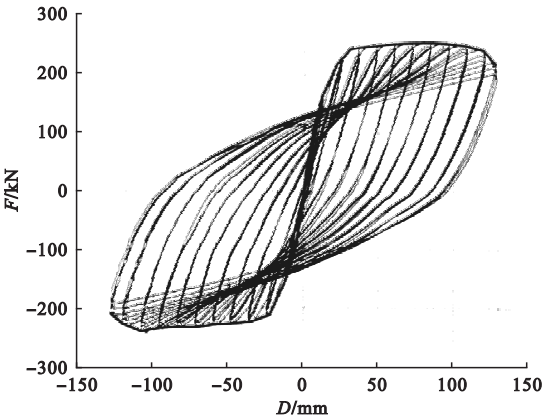


图 16 节段预应力试件滞回曲线

Fig. 16 Hysteretic curve of prestressed specimens

模型的水平荷载-墩顶位移滞回曲线,反映其基本抗震性能,包括模型的延性变形能力、耗能能力和残余变形能力等<sup>[21-23]</sup>.由图可以看出,现浇桥墩模型滞回环始终保持狭窄的长条形,而装配式节段预应力桥墩模型在受力方面反映出变形性能较好,桥墩在抗震性能和耗能能力较为显著,从滞回曲线

中计算得到预应力双柱墩与现浇模型参数如 表3 所示.

表3 桥墩模型参数对比  
Table 3 Comparison of pier model parameters

桥墩类型	极限荷载/kN	屈服荷载/kN	极限位移/mm	屈服位移/mm	延性系数
整体现浇	212.9	180.6	105.8	18.4	5.75
预应力装配式	245.1	217.8	122.7	20.4	6.05

4 结 论

(1)有限元模拟了装配式预应力拼装桥墩在拟静力分析过程中混凝土的破坏,钢筋的屈服以及刚度的退化,较好地反映出双柱墩在地震作用下的受力性能.

(2)装配式拼装桥墩的节段之间不产生水平滑移,节段间设置的剪力键起到了水平抗剪作用,可以显著提高装配式节段桥墩的承载能力,保证在承受荷载作用时具有较好的整体性,提高模型的抗剪承载力和整体性能.

(3)采用预应力钢绞线的构件水平抗力明显好于现浇桥墩,具有较好的自复位能力.装配式预应力节段桥墩的滞回曲线较为饱满,与现浇桥墩相比,预应力节段构件具有强度稳定段,现浇构件没有强度稳定段.

(4)现浇混凝土桥墩试件是以弯曲破坏为主的延性破坏,在连接部位承台与桥墩间以及盖梁与桥墩间形成较为充分的塑性铰.装配式预应力拼装桥墩与整体现浇桥墩相比,具有较好的耗能性能,破坏发生于节段间耗能钢筋的屈服.装配式预应力试件的残余位移比现浇试件小,随着位移的增加而增加的程度也小.

参考文献

[ 1 ] CHANG K C,OU Y C,TSAI M,et al. Cyclic behavior of precast segmental concrete bridge columns with high performance or conventional steel reinforcing bars as energy dissipation bars [ J ]. Earthquake engineering and structural dynamics,2010,39(11) :1181 - 1198.

[ 2 ] HASELTON C B,LIEL A B,SARAH T L,et al. Beam-column element model calibrated for predicting flexural response leading to glob-

al collapse of RC frame buildings [ R ]. PEER research report;University of California-Berkeley,2008.

[ 3 ] 李贵乾,郑罡,高波. 基于 OpenSees 的钢筋混凝土桥墩拟静力试验数值分析[ J ]. 世界地震工程,2011,27(1) :110 - 114.  
( LI Guiqian,ZHENG Gang,GAO Bo. Numerical analysis for pseudo-static tests of reinforced concrete bridge columns based on OpenSees [ J ]. World earthquake engineering,2011,27(1) :110 - 114. )

[ 4 ] 王志强,葛继平,魏红一,等. 节段拼装桥墩抗震性能研究进展[ J ]. 地震工程与工程振动,2009,29(4) :147 - 154.  
( WANG Zhiqiang,GE Jiping,WEI Hongyi,et al. Recent development in seismic research of segmental bridge columns [ J ]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration,2009,29(4) :147 - 154. )

[ 5 ] PALERMO A,PAMPANIN S,CALVI G M. Concept and development of hybrid solutions for seismic resistant bridge systems[ J ]. Journal of earthquake engineering,2005 9(5) :1 - 23.

[ 6 ] PALERMO 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 - 1661.

[ 7 ] 刘少乾. 预应力节段拼装混凝土桥墩拟静力试验研究及数值分析[ D ]. 重庆:重庆交通大学,2014.  
( LIU Shaoqian. Experimental study and numerical analysis on prestressed precast segmental concrete bridge piers [ D ]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2014. )

[ 8 ] 黄宜. 装配式钢筋混凝土桥墩抗震性能研究[ D ]. 大连:大连理工大学,2016.  
( HUANG Yi. Study on seismic performance of precast reinforced concrete bridge piers [ D ]. Dalian: Dalian University of Technology,2016. )

[ 9 ] 葛继平,王志强,魏红一. 干接缝节段拼装桥墩抗震分析的纤维模型模拟方法[ J ]. 振动与冲击,2010,29(3) :52 - 57.  
( GE Jiping,WANG Zhiqiang,WEI Hongyi. Seismic performance analysis of segmental bridge columns with match-cast dry joints using fiber beam-column element method [ J ].

- Journal of vibration and shock, 2010, 29(3): 52-57.)
- [10] 张战廷, 刘宇锋. ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型[J]. 建筑结构, 2011(增刊2): 229-231.  
(ZHANG Zhanting, LIU Yufeng. Concrete damaged plasticity model in ABAQUS[J]. Building structure, 2011(S2): 229-231.)
- [11] 王会利, 秦泗凤, 张哲. 预应力度对预应力混凝土桥墩抗震性能影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(1): 27-29.  
(WANG Huili, QIN Sifeng, ZHANG Zhe. Study on the effect of prestressed degree on seismic performance of prestressed concrete pier[J]. Journal of Wuhan university of technology (transportation science and engineering), 2013, 37(1): 27-29.)
- [12] 布占宇, 唐光武. 无黏结预应力带耗能钢筋预制节段拼装桥墩抗震性能研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(3): 33-40.  
(BU Zhanyu, TANG Guangwu. Seismic performance investigation of unbonded prestressing precast segmental bridge piers with energy dissipation bars[J]. China railway science, 2011, 32(3): 33-40.)
- [13] 张明生. 无粘结部分预应力钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究与模拟分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
(ZHANG Mingsheng. Study on seismic performance of unbonded partly prestressed reinforced concrete piers[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.)
- [14] 刘涛涛. 桥墩延性抗震设计的安全性评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.  
(LIU Taotao. The safety evaluation of bridge pier for the ductility seismic design[D]. Chengdu: Xinan Jiaotong University, 2011.)
- [15] RAYNOR D J, LEHMAN D E, STANTON J F. Bond-slip response of reinforcing bars grouted inducts[J]. ACI structural journal, 2002, 99(5): 568-576.
- [16] OU Y C, WANG P S, TSAI M, et al. Large-scale experimental study of precast segmental un-bonded post-tensioned concrete bridge columns for seismic regions[J]. Journal of structural engineering, 2010, 136(3): 255-264.
- [17] 高婧, 葛继平, 林铁良. 干接缝节段拼装桥墩拟静力试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 4: 211-216.  
(GAO Jing, GE Jiping, LIN Tielang. Pseudo static test for precast segmental bridge columns with dry joints[J]. Journal of vibration and shock, 2011, 4: 211-216.)
- [18] SHIM C S, CHUNG C H, KIM H H. Experimental evaluation of seismic performance of precast segmental bridge piers with a circular solid section[J]. Engineering structures, 2008, 30(12): 3782-3792.
- [19] 邹琳斌. 体外预应力节段施工混凝土桥梁干接缝剪切性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.  
(ZOU Linbin. Research on shear properties of dry joint in segmental precast concrete bridges with external tendons[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012.)
- [20] 刘劲松, 刘红军. ABAQUS 钢筋混凝土有限元分析[J]. 装备制造技术, 2009(6): 69-70.  
(LIU Jinsong, LIU Hongjun. ABAQUS finite element analysis of reinforced concrete[J]. Equipment manufacturing technology, 2009(6): 69-70.)
- [21] 赵宁, 魏红一. 节段拼装桥墩拟静力试验研究[J]. 上海公路, 2008(4): 24-28.  
(ZHAO Ning, WEI Hongyi. Pseudo static test investigation on segmental precast erected prestressed columns[J]. Shanghai highways, 2008(4): 24-28.)
- [22] 刘丰. 节段拼装预应力混凝土桥墩拟静力试验和分析研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.  
(LIU Feng. Cyclic tests study and nonlinear finite element analysis on seismic behavior of prestressed precast segmental bridge piers[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.)
- [23] 葛继平, 刘丰, 魏红一, 等. 胶接缝连接的节段拼装桥墩抗震分析模型[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(5): 880-883.  
(GE Jiping, LIU Feng, WEI Hongyi, et al. Seismic analytical model of segmental bridge column with match-cast epoxy joints[J]. Journal of Wuhan university of technology (transportation science & engineering), 2009, 33(5): 880-883.)