

# 现浇及装配式桥墩刚度折减对比分析

程邦兴

(四川公路桥梁建设集团有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要:** 利用 ANSYS 有限元软件建立装配式和现浇桥墩局部分析模型, 对墩柱的纵横向尺寸进行参数化处理, 以桥墩顶缘位移为控制条件, 分析需折减的桥墩参数和折减后的桥墩尺寸。结果表明, 在 E2 地震作用下, 现浇桥墩的刚度折减为装配式的 0.85 倍, 即顺桥向现浇桥墩尺寸折减为原尺寸的 0.947 3 倍时, 装配式桥墩和现浇桥墩在地震作用下的受力特性基本一致。

**关键词:** 桥梁; 装配式桥墩; 现浇桥墩; 灌浆套筒; 刚度折减; 地震作用

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)04-0115-06

随着人工成本的急剧上升和人们环境保护意识的提高, 装配式桥梁被广泛采用。对于装配式桥梁的地震响应, 邵淑营对预应力灌浆波纹管装配式墩的可行性进行探讨, 分析了灌浆波纹管装配式桥墩的抗震性能; 郑永峰等通过试验研究和有限元仿真分析, 实现了套筒与灌浆料及灌浆料与连接钢筋间的相互作用分析的模拟, 并研究了变形灌浆套筒的设计方法。基于各学者的研究成果, 该文研究采用灌浆套筒进行节段拼接连接时, 装配式梁桥桥墩内力和墩顶位移相对现浇梁桥的变化情况, 研究现浇桥墩及节段装配式桥墩的刚度折减。

## 1 工程概况

以某高速公路 TJ-3 标段中五跨一联预应力砼先简支后连续桥梁为背景进行研究。该桥跨径布置为 (40+40+40+40+40) m, 上部结构标准宽度为 16.75 m。主梁采用装配式预应力砼小箱梁, 下部结构为双柱式实心桥墩, 桩柱截面直径均为 2.2 m。主梁细部构造见图 1, 桥墩墩身及盖梁的一般构造见图 2。

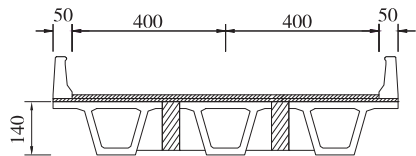


图 1 桥梁上部结构主梁横截面布置(单位: cm)

## 2 有限元模型的建立

根据 JTG/T B02-01-2008《公路桥梁抗震细则》, 该桥主桥抗震设防等级为 8 级, E1、E2 地震作

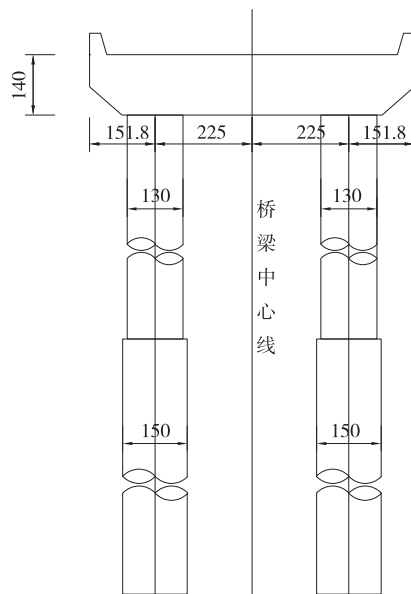


图 2 桥墩墩身及盖梁的一般构造(单位: cm)

用下抗震重要性系数  $C_i$  分别取 0.43、1.3。

先利用 MIDAS/Civil 建立预制拼装结构仿真分析模型, 分析在 E1、E2 地震作用下上部结构对盖梁纵向、水平向剪切力的影响及盖梁顶面承受上部结构恒载工况下结构在顺桥向、横桥向的位移变化。根据计算分析结果, 在上部结构恒载作用下, 墩顶承受的竖向力为 7 500 kN。E1、E2 地震作用下单根墩柱在盖梁位置处顺桥向和横桥向的剪切力见表 1。

表 1 单根墩柱盖梁位置处顺桥向和

地震作用	横桥向的剪切力	
	纵向剪切力	横向剪切力
E1	151	153
E2	456	463

基于 MIDAS 整桥抗震模型中桥墩的构造形式和设计计算结果,采用 ANSYS 有限元分析软件,综合考虑砼、钢筋、灌浆套筒等材料的非线性因素。预制模型中,预制盖梁、预制桥墩、承台均采用实体单元 Solid45 模拟,弹性模量为 34.5 GPa,泊松比为 0.2,材料密度取  $2\,500\text{ kg/m}^3$ ;桩基采用可考虑剪切变形的 Beam188 梁单元模拟;桩基和周围土体之间的土弹簧在顺桥向和横桥向分别采用 Combin14 模拟,土弹簧的刚度采用 M 法计算。

为真实模拟预制墩柱与盖梁、承台之间的灌浆套筒连接,采用如下方法进行处理:假设预制墩的顶、底面与盖梁、承台之间采用面面接触,面面接触的法向刚度设为无穷大,当接触面间出现拉应力时即脱离;水平方向上,设置接触面的摩擦系数为 0.3;盖梁和墩柱、承台和墩柱之间均采用灌浆套筒建模,钢筋和套筒采用实体单元 Solid187 模拟,灌浆料采用 Solid65 模拟,钢筋与灌浆料及灌浆料与套筒之间的粘结采用接触单元 Target170 与 Contail74 模拟。实常数根据实际配筋情况设置,钢筋材料采用理想弹塑性本构关系来模拟。鉴于结构的对称性,仅建立结构的 1/2 模型。预制装配式结构整体模型见图 3,细部钢筋连接见图 4。



图3 节段装配式桥墩实体有限元分析模型

### 3 ANSYS 有限元分析

根据表 1 中单墩承受的剪切力,在局部精细化模型中,分别求解结构在相应荷载作用下的墩顶位移。地震作用下桥墩位移见图 5~8,灌浆套筒位置处的连接钢筋应力见图 9、图 10,各预制墩顶、底接触状态见图 11~14。

由图 5~8 可知:在顺桥向即桥纵向,E1、E2 地震作用下墩顶最大位移分别为 0.018、0.058 m,后者

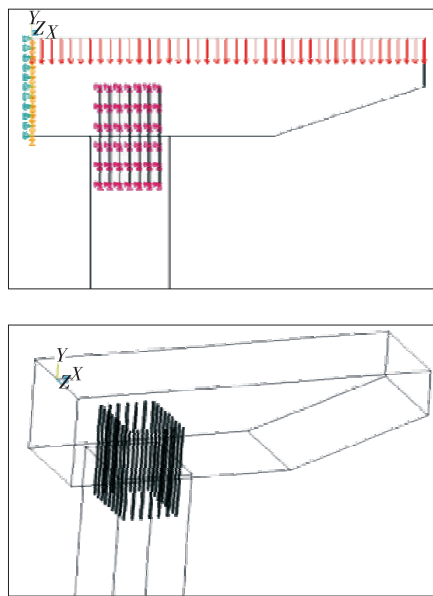


图4 灌浆套筒连接钢筋模型

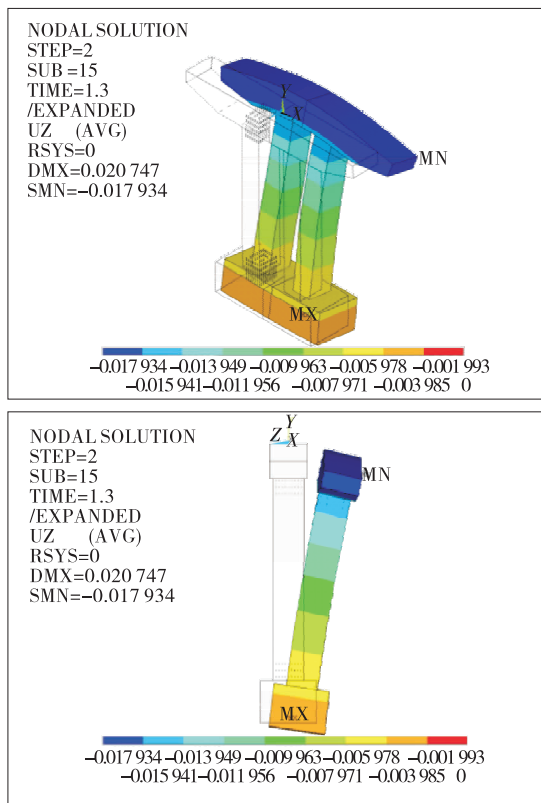


图5 E1地震纵向作用下桥墩顺桥向变形云图(单位:m)

是前者的 3.22 倍,说明 E2 地震作用对结构顺桥向的影响大于 E1 地震作用。在横桥向,E1、E2 地震作用下墩顶最大位移均为 0.033 m,两种地震作用下墩顶最大位移一致,说明其对结构横桥向的作用基本一致。

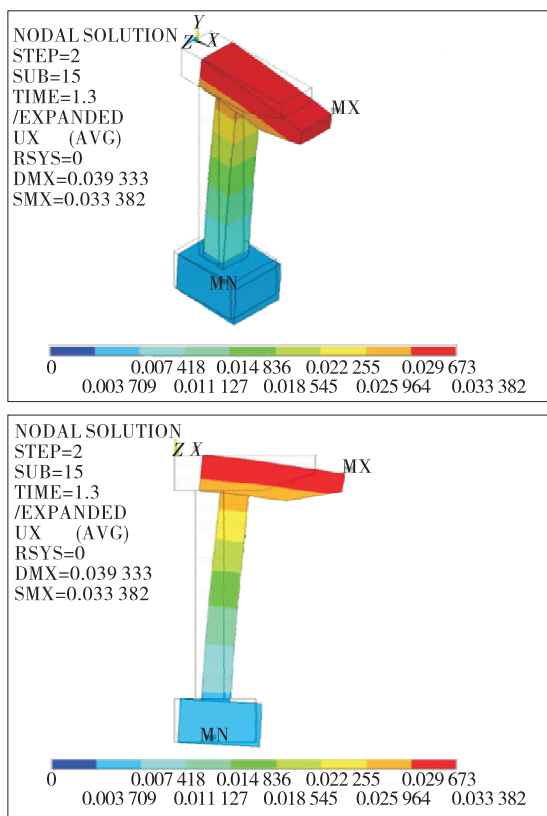


图 6 E1 地震横向作用下桥墩横桥向变形云图(单位:m)

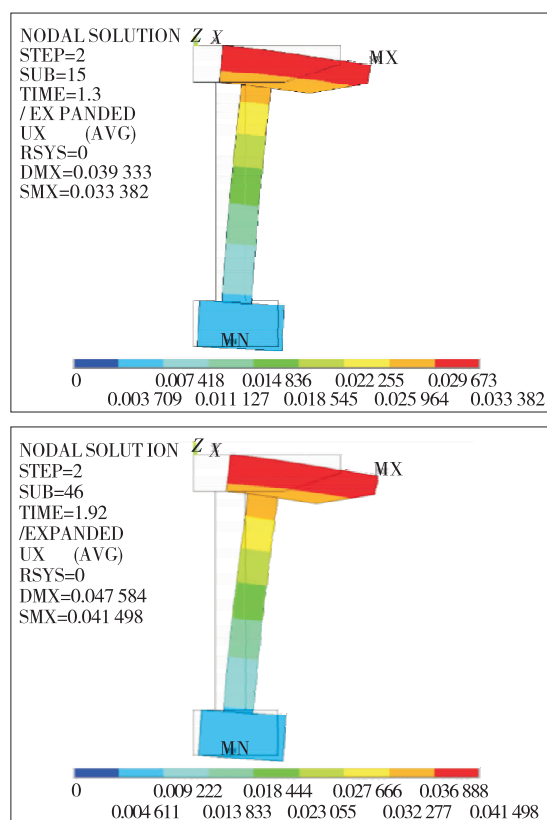


图 8 E2 地震横向作用下桥墩横桥向变形云图(单位:m)

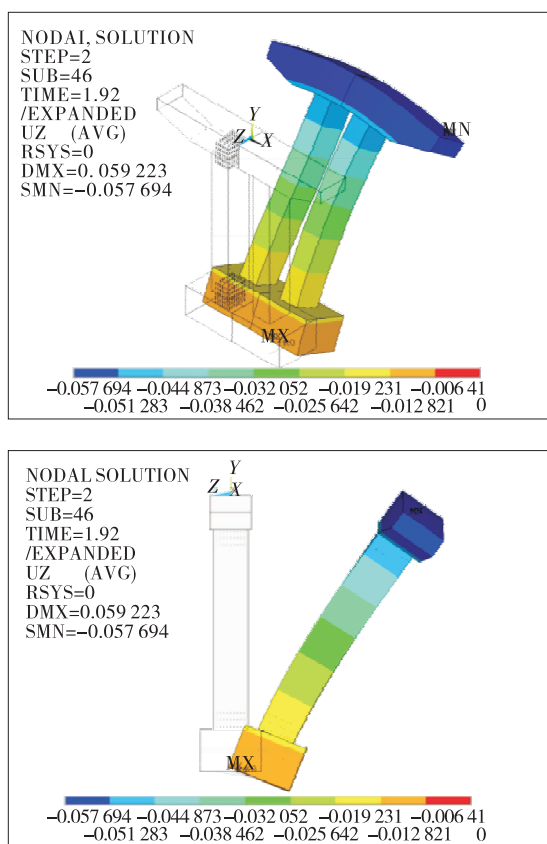


图 7 E2 地震纵向作用下桥墩顺桥向变形云图(单位:m)

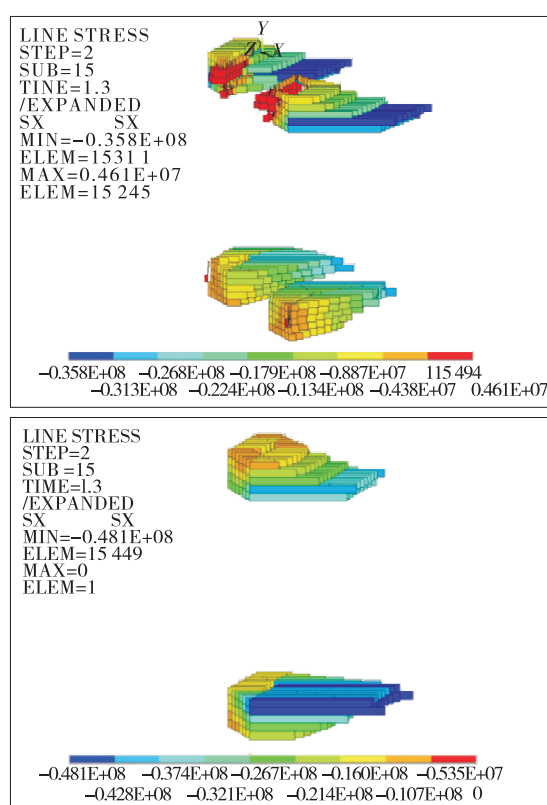


图 9 E1 地震纵向、横向作用下套筒内连接钢筋应力云图(单位:Pa)

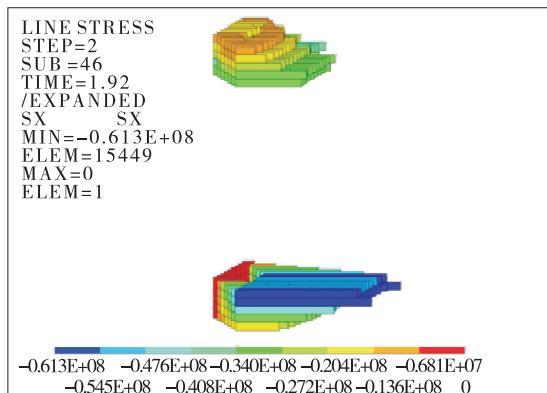
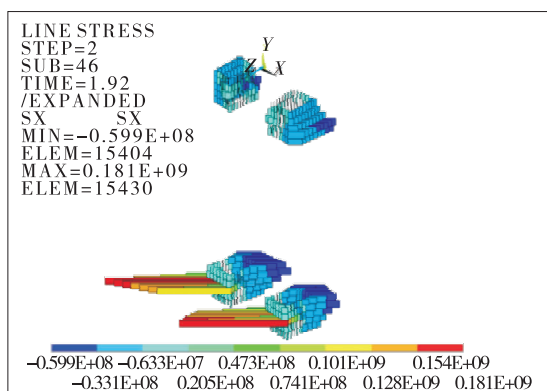


图 10 E2 地震纵向、横向作用下套筒内连接钢筋应力云图(单位:Pa)

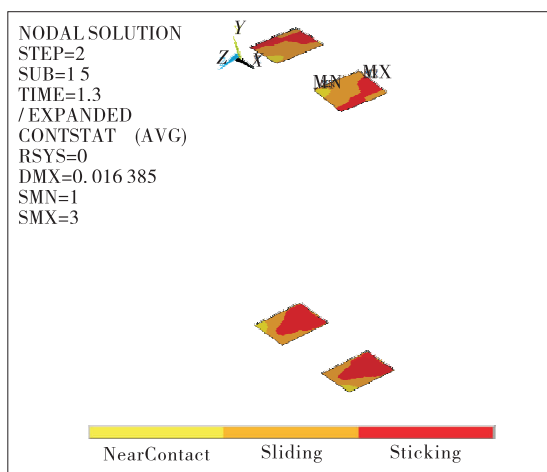


图 11 E1 地震纵向作用下节段装配式桥墩墩顶、底接触状态

由图 9、图 10 可知:在顺桥向,E1 地震产生的套筒内接触钢筋最大压应力为  $3.58 \times 10^7$  Pa,最大拉应力为  $4.61 \times 10^6$  Pa;E2 地震产生的套筒内接触钢筋最大压应力为  $5.99 \times 10^7$  Pa,最大拉应力为  $1.81 \times 10^8$  Pa。在横桥向,E1 地震产生的套筒内接触钢筋最大压应力为  $4.81 \times 10^7$  Pa;E2 地震产生的套筒内接触钢筋最大压应力为  $6.13 \times 10^7$  Pa。

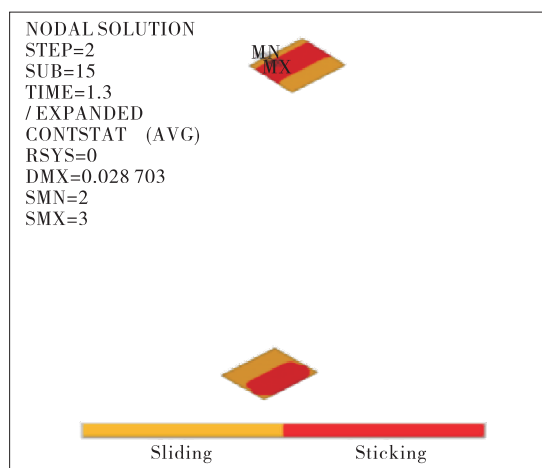


图 12 E1 地震横向作用下节段装配式桥墩墩顶、底接触状态

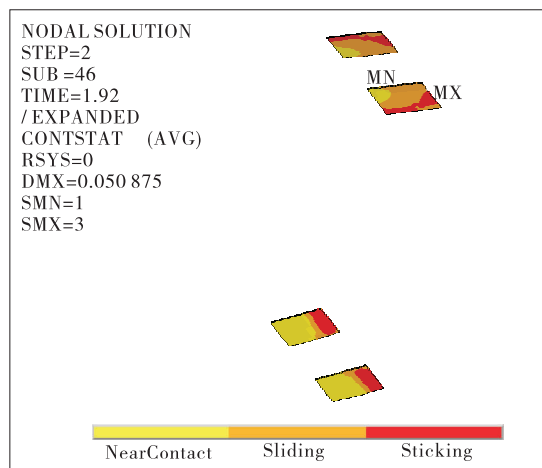


图 13 E2 地震纵向作用下节段装配式桥墩墩顶、底接触状态

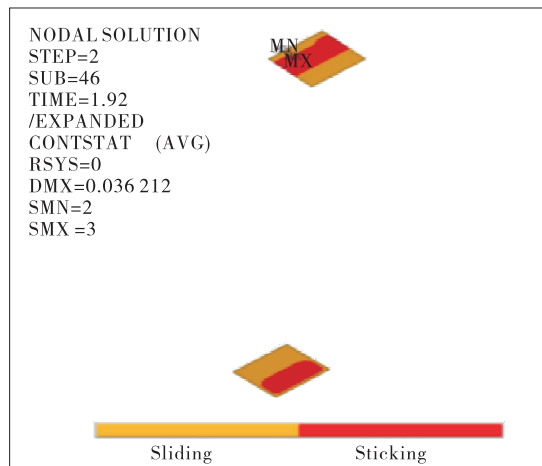


图 14 E2 地震横向作用下节段装配式桥墩墩顶、底接触状态

由图 11~14 可知:1) 在顺桥向,E1 地震产生

的墩底与承台接触面的接触状态大部分为固结状态,少部分接触面接触滑移;墩顶与盖梁的接触状态大部分为接触滑移状态,少部分为固结状态。E2 地震产生的墩底与承台接触面的接触状态大部分为非接触状态,少部分接触面固结;墩顶与盖梁的接触状态大部分为接触滑移状态,少部分为固结状态。E2 地震作用下接触状态固结程度低于 E1 作用下结构状态,特别是墩底与承台的接触部位基本处于非接触状态。2) 在横桥向,E1 地震产生的墩底与承台接触面的接触状态为固结状态和接触滑移状态各占一半,墩顶与盖梁的接触状态基本和墩底接触状态相同;E2 地震产生的墩底与承台接触面的接触状态为固结状态和接触滑移状态各占一半,墩顶与盖梁的接触状态基本和墩底接触状态相同。E1、E2 地震作用下墩底和墩顶的接触状态基本相同。

4 现浇桥墩及装配式桥墩刚度折减研究

鉴于目前主要采用杆系单元进行桥梁抗震分析,且不考虑预制结构接头原因导致的结构刚度的影响,通过折减常规现浇结构墩柱刚度的方法模拟折减效应。与预制结构模型类似,建立现浇桥墩局部模型(见图 15),其中墩柱与盖梁、承台均现浇,作为整体模型进行分析,且无需灌浆套筒连接钢筋,故偏安全地仅考虑砼参与受力。现浇模型采用与图 3 相同的约束条件和荷载。

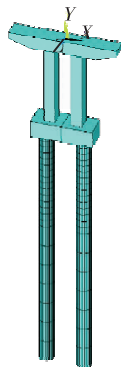


图 15 现浇桥墩局部模型

采取如下折减方法:1) 计算顺桥向折减时,保持墩柱横向尺寸不变,仅折减墩柱纵向尺寸,达到墩柱刚度折减的目的;2) 计算横桥向折减时,保持墩柱纵向尺寸不变,仅折减墩柱横向尺寸,达到墩柱刚度折减的目的。为此,基于 ANSYS 软件的批处理方法编写结构的批处理命令,将墩柱纵向尺寸、横向尺寸均参数化处理,以结构顶缘位移为控制条件进

行批量计算。

4.1 现浇桥墩顺桥向的折减

改变桥墩的顺桥向受力,在受力为 0~500 kN 时,以 10 kN 为加载力间隔对装配式桥墩墩顶位移进行计算,得到装配式桥墩顺桥向荷载一位移曲线(见图 16)。由图 16 可知:装配式桥墩顺桥向受力为 151 kN 时,墩顶位移为 17.87 mm;顺桥向受力为 456 kN 时,墩顶位移为 57.45 mm。

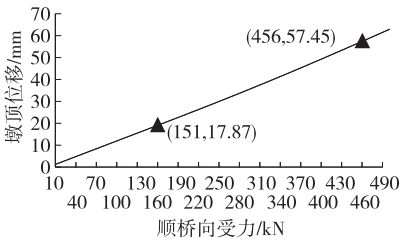


图 16 节段装配式桥墩墩顶顺桥向荷载一位移曲线

不同刚度折减系数下现浇桥墩顺桥向刚度折减位移见表 2,其中惯性矩  $I=bh^3/12$  ( $b$  为桥墩宽度,  $h$  为桥墩长度)。由表 2 可知:在 E1 地震力 151 kN 作用下,现浇桥墩刚度不经过折减时顺桥向位移为 17.96 mm,和装配式桥墩相同受力时的墩顶位移 17.87 mm 相差不大,差值为 0.5%,表明顺桥向桥墩刚度在 E1 地震作用下无需进行刚度折减;在 E2 地震力 456 kN 作用下,现浇桥墩刚度折减为 0.85 倍时顺桥向位移为 57.25 mm,和装配式桥墩相同受力时的墩顶位移 57.45 mm 相差不大,差值为 0.3%,

表 2 现浇桥墩顺桥向刚度折减后的位移

刚度折 减系数	$I/\text{m}^4$	$b/\text{m}$	$h/\text{m}$	地震作用下位移/mm	
				E1	E2
1.00	1.067	1.6	2.000 0	17.96	54.24
0.95	1.013	1.6	1.966 1	18.23	55.07
0.90	0.960	1.6	1.931 0	18.52	55.95
0.85	0.907	1.6	1.894 5	18.85	57.25
0.80	0.853	1.6	1.856 6	19.16	57.86
0.75	0.800	1.6	1.817 1	19.45	58.75
0.70	0.747	1.64	1.775 8	19.84	59.93
0.65	0.693	1.6	1.732 5	20.37	61.52
0.60	0.640	1.6	1.686 9	20.99	63.39
0.55	0.587	1.6	1.638 6	21.61	65.28
0.50	0.533	1.6	1.587 4	22.54	68.08
0.45	0.480	1.6	1.532 6	23.61	71.31
0.40	0.427	1.6	1.473 6	24.77	74.80
0.35	0.373	1.6	1.409 5	26.40	79.72
0.30	0.320	1.6	1.338 9	28.68	86.62



表明顺桥向装配式桥墩刚度在 E2 地震作用下需折减为现浇桥墩的 0.85 倍,此时现浇桥墩刚度折减后的纵向位移见图 17。

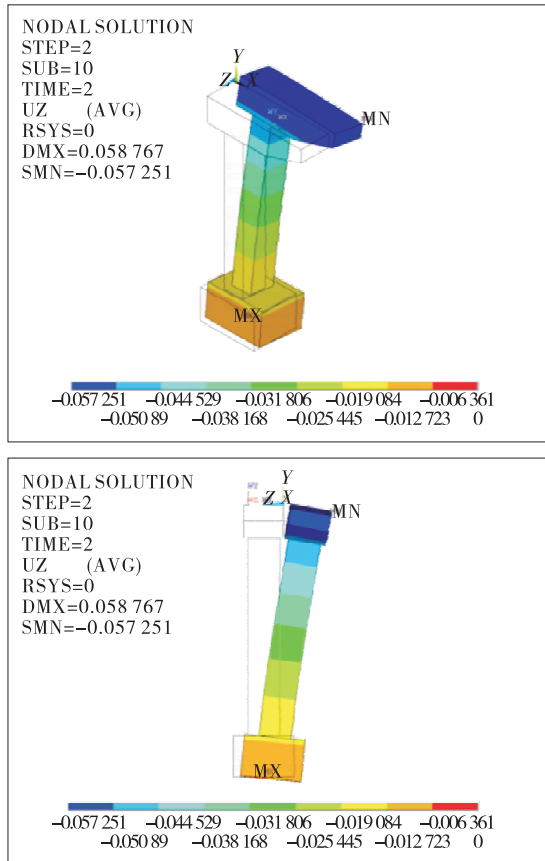


图 17 E2 地震下顺桥向墩柱刚度折减为原来的 0.85 时的纵向位移(单位:m)

#### 4.2 现浇桥墩横桥向的折减

改变桥墩的横桥向受力,在受力为 0~500 kN 时,以 10 kN 为加载力间隔对装配式桥墩墩顶位移进行计算,得到装配式桥墩横桥向荷载一位移曲线(见图 18)。由图 18 可知:装配式桥墩横桥向受力为 153 kN 时,墩顶位移为 3.89 mm;横桥向受力为 463 kN 时,墩顶位移为 12.06 mm。

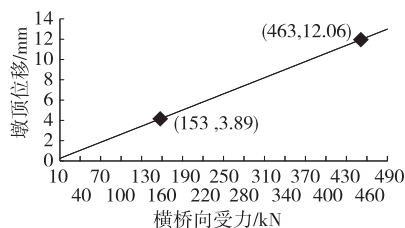


图 18 装配式桥墩横桥向荷载一位移曲线

现浇桥墩横桥向刚度折减时的位移见表 3。由表 3 可知:在 E1 地震力 153 kN 作用下,现浇桥墩

刚度不经过折减时横桥向最大位移为 3.98 mm,与装配式桥墩相同受力时墩顶最大位移 3.89 mm 相差不大,差值为 2.2%,表明横桥向桥墩刚度在 E1 地震作用下无需进行折减;在 E2 地震力 463 kN 作用下,现浇桥墩刚度不经过折减时横桥向最大位移为 12.06 mm,和装配式桥墩相同受力时墩顶最大位移 12.06 mm 一致,表明横桥向桥墩刚度在 E2 地震作用下也无需折减。

表 3 现浇桥墩横桥向刚度折减后的位移

刚度折 减系数	$I/m^4$	$b/m$	$h/m$	地震作用下位移/mm	
				E1	E2
1.00	0.683	1.600 0	2	3.98	12.06
0.95	0.649	1.572 9	2	4.04	12.27
0.90	0.614	1.544 8	2	4.12	12.50
0.85	0.580	1.515 6	2	4.20	12.75
0.80	0.546	1.485 3	2	4.30	13.04
0.75	0.512	1.453 7	2	4.41	13.37
0.70	0.478	1.420 6	2	4.53	13.73
0.65	0.444	1.386 0	2	4.66	14.16
0.60	0.410	1.349 5	2	4.83	14.65
0.55	0.375	1.310 9	2	5.01	15.22
0.50	0.341	1.269 9	2	5.24	15.91
0.45	0.307	1.226 1	2	5.51	16.75
0.40	0.273	1.178 9	2	5.85	17.79
0.35	0.239	1.127 6	2	6.30	19.13
0.30	0.205	1.071 1	2	6.88	20.92

#### 5 结论

参考东南大学土木工程学院进行的灌浆套筒连接性能试验及有限元模型建立分析过程,建立主桥装配式桥墩及现浇桥墩的有限元实体分析模型,对比分析 E1 和 E2 地震作用下顺桥向、横桥向墩柱墩顶位移及套筒内连接钢筋应力和预制墩顶、底接触状态。结果表明:结构顺桥向 E2 地震作用的影响大于 E1 地震作用;墩底和墩顶的接触状态在 E1、E2 地震作用下基本一致。

通过 ANSYS 软件将墩柱纵、横向尺寸进行参数化处理,以结构顶缘位移为控制条件进行批量计算。结果表明:在 E2 地震作用下,现浇桥墩的刚度折减为 0.85 倍,即顺桥向现浇桥墩尺寸折减为原尺寸的 0.947 3 倍时,节段装配式桥墩和现浇桥墩在地震作用下的受力特性基本一致。

(下转第 124 页)