

大跨度连续刚构桥施工阶段与动力分析模型建立研究^①

张奋杰^②

(石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 针对地震作用下处于施工阶段的高墩大跨度连续刚构桥, 在地震作用下发生较严重破坏的问题, 本文以一座典型高墩大跨连续刚构桥为背景, 采用MIDAS/Civil建立桥跨结构, 考虑结构自重、桥面铺装、预应力、施工荷载及收缩徐变等因素的施工阶段分析模型, 再通过OpenSees建立考虑碰撞效应的精细化动力分析模型并进行动力特征值分析。结果表明: 通过对桥跨结构进行静力施工阶段分析, 可以得到桥跨结构在施工阶段的薄弱位置; 动力分析对比, 分析周期比验证动力模型的准确性, 为高墩大跨度连续刚构桥抗震分析提供有限元模拟基础。

关键词: 大跨度连续刚构桥; 施工阶段; 动力模型; OpenSees

中图分类号: TU992.05 **文献标识码:** A

预应力混凝土连续刚构桥, 因其整体性好、施工简便、造价低、抗震性能优越等特点, 在桥梁建设中得到广泛使用^[1-2]。近几十年, 国内外高烈度地震频发, 对震区桥梁造成了严重的破坏, 不仅造成人员伤亡和国家财产损失, 而且对灾后救援工作的开展造成极大困难^[3]。连续刚构桥是把桥墩和箱梁固结为整体的桥梁结构新体系。

采用悬臂施工法的高墩大跨度连续刚构桥施工工期长, 施工过程复杂, 使成桥前后各施工阶段内力状态差异大, 对成桥后的动力反应影响较大。因此, 本文以一座高墩大跨度连续刚构桥为研究对象, 采用MIDAS/Civil和OpenSees分别建立桥梁的动力分析模型, 通过动力分析对比验证模型的合理性, 为桥梁结构精细化动力分析提供依据。

1 工程概况

本文以结构体系为连续刚构120m+220m+120m+简支T梁4m×40m的高墩大跨连续刚构桥为研究对象。该桥全长为620m, 桥面总宽12m, 桥面横坡为2%, 如图1所示。桥址场地类别为Ⅱ类, 抗震设防烈度为9°。

主桥上部结构为120m+220m+120m的三跨预

应力混凝土连续刚构, 主桥箱梁设计为单箱单室断面, 箱梁顶板宽12m, 底板宽8m, 主梁截面采用变截面。墩顶施工0#块梁长14m, T形刚构主梁悬臂段共分为32对梁段, 其梁段数和梁段长度从根部至跨中依次为9m×2.5m、9m×3m、7m×3.5m、7m×4m, 最大悬臂长度为102m。全桥共有1个2m的主跨跨中合龙梁段和两个2m的边跨合龙梁段。两个边跨现浇梁段各长9m。引桥上部结构为标准跨径40m的简支T梁。

主桥桥墩为钢筋混凝土双薄壁空心墩, 1#墩高88m, 2#墩高85m, 3#交接墩为钢筋混凝土空心墩, 墩高38m。引桥桥墩为钢筋混凝土空心墩, 4#墩高56m, 5#墩高56m, 6#墩高50m。梁体采用C50混凝土, 桥墩采用C40混凝土。普通钢筋采用Ⅰ级钢筋和Ⅱ级钢筋两种。预应力钢筋采用φ15.24mm预应力钢绞线, 抗拉强度为1860MPa。0#桥台、3#桥墩顶设置盆式支座, 3#、4#、5#和6#桥墩及7#桥台设置板式橡胶支座。

2 施工阶段模拟与分析

2.1 施工方法及阶段划分

悬臂施工法是现阶段应用最普遍的连续刚构

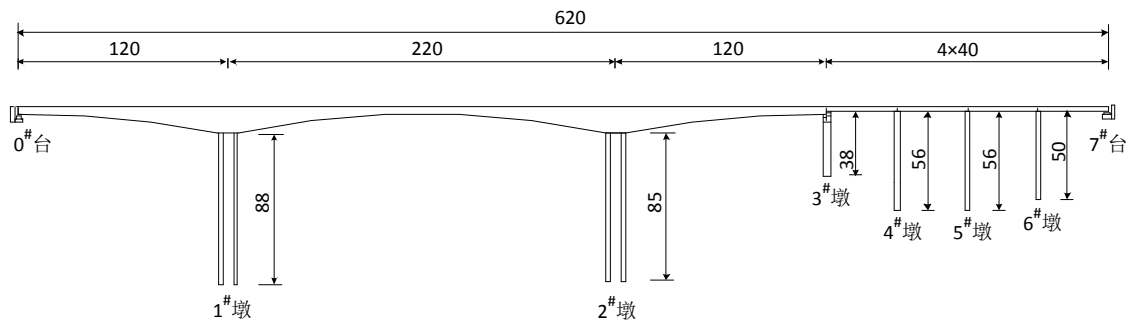


图1 全桥结构示意图 (m)

① 基金项目: 石河子大学校级项目 (ZZZC202005B)。

② 作者简介: 张奋杰 (1993—), 男, 甘肃酒泉市, 硕士, 石河子大学水利建筑工程学院讲师, 研究方向: 桥梁抗震。

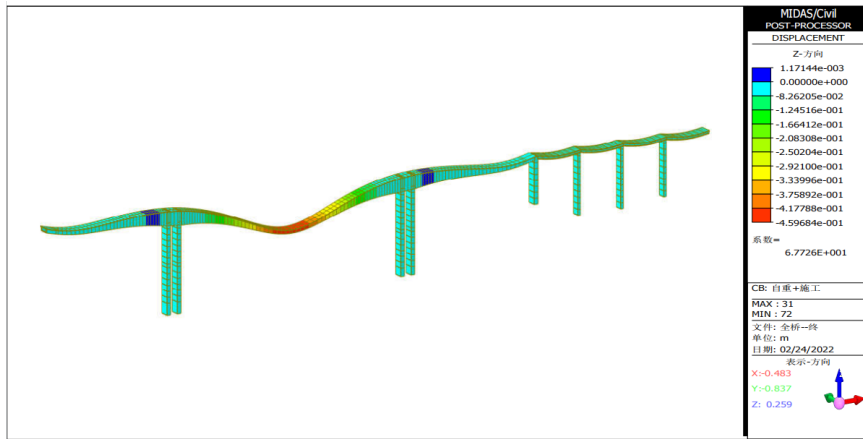


图3 成桥阶段主梁挠度

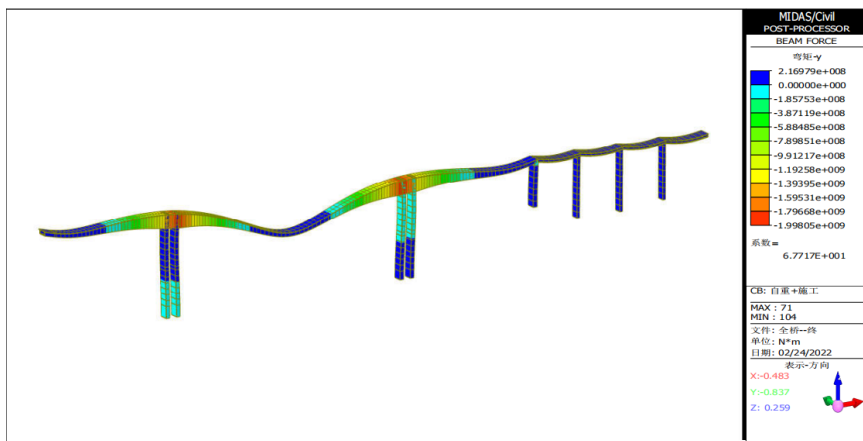


图4 成桥阶段主梁弯矩

桥施工方式。其主要施工步骤如下：

(1) 基础和主桥墩身施工，主桥墩身采用滑模施工。

(2) 在1#、2#墩上安装墩旁托架，然后在墩顶及托架上立模浇注0#块。

(3) 等0#块达到预期强度，拆除墩旁托架并在0#块上安装挂篮，分段浇注箱梁1#~32#节段，使1#、2#墩形成T构。采用挂篮施工时挂篮承受最大梁块质量211.4t。安装0#台和3#墩顶永久性盆式橡胶支座，并拼装边跨支架，浇注边跨现浇段。

(4) 拆除1#、2#墩T构挂篮，在边跨2m合龙段设置水平刚性支撑，安装边跨合龙段吊架，T构悬臂端加平衡压重，浇注边跨合龙段混凝土，分级拆除压重，待混凝土达到设计强度的85%以后，张拉部分底板钢束，完成边跨合龙。

(5) 设置中跨合龙段吊架，浇注中跨合龙段混凝土，待混凝土达到设计强度的85%以后，张拉中跨、边跨剩余预应力束，完成中跨合龙。拆除边跨9m梁段落地支架及合龙段吊架。进行桥面系施工。

2.2 施工阶段分析模型

采用MIDAS/Civil建立桥梁的有限元分析模型，如图2所示。整个模型采用一般梁单元模拟，共计399个节点，388个单元。建模时考虑二期铺装、预应力，预应力钢束共计452束，分布于顶板、底板以及腹板，施工共分40个阶段，考虑10年收缩徐变影响。

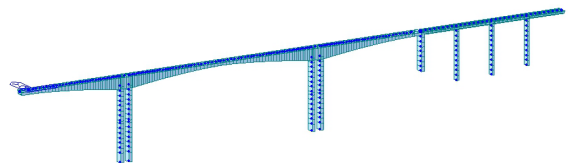


图2 全桥施工模型示意图

2.3 施工阶段分析

由于悬臂浇注施工的预应力混凝土大跨度连续刚构桥分节段施工，需要经历不同的体系转换，结构受力复杂，对施工技术和施工精度要求高。因此，必须对施工阶段的桥梁进行施工阶段分析，以确保桥梁在施工过程中的结构安全，为了保证大跨度连续刚构桥在施工完成后的外形和内力状态与设计要求的相符，需要在施工过程中对其进行挠度分析和内力分析。

图3和图4给出了施工阶段桥梁在荷载作用下主梁的挠度、弯矩与桥梁跨径的关系。由图可得，大跨度连续刚构桥在成桥后其薄弱部位主要为中跨跨中和悬臂梁根部部位(0#块)，此结果与汶川大地震中庙子坪大桥震害结果相吻合。因此，对整个桥梁结构进行施工阶段分析，可为施工阶段和成桥阶段的精准抗震分析提供基础。

3 动力模型模拟方法

动力模型在MIDAS/Civil静力分析模型基础上，将节点、质量、单元及边界条件等导入

OpenSees, 然后根据桥梁实际情况和研究需要, 进行规整化处理而建立模型。建模过程包括数值建模、荷载分布、边界条件、荷载组合以及运算分析。其中, 梁体、桥墩均采用梁柱单元模拟, 桥墩塑性铰区采用纤维截面。本模型不考虑桩土相互作用, 因此在墩底固结。

3.1 支座模拟

主桥采用盆式橡胶支座, 引桥采用板式橡胶支座。依据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020) 规定, 板式橡胶支座用线性弹簧单元模拟; 活动盆式支座用双线性理想弹塑性弹簧单元模拟。

通过计算, 0# 台端主桥盆式支座刚度K1取1.5104kN/m, 过渡墩主桥盆式支座K2取1.5104kN/m; 过渡墩引桥盆式支座K3取1.62103kN/m, 其余引桥和7# 桥台板式橡胶支座K4取1.62103kN/m。

3.2 碰撞效应模拟

主桥与引桥、引桥与引桥相邻梁体以及桥台与主桥、桥台与引桥梁体间的纵向碰撞采用基于Hertz-damp的双线性碰撞模型模拟, 并在OpenSees中利用碰撞材料和Two Node Link单元实现。经计算, 桥台与梁体碰撞刚度Kt1取3.29105kN/m, 主桥与引桥、引桥与引桥梁体碰撞刚度Kt2取6.9106kN/m; 伸缩缝初始间隙取5cm。利用碰撞材料和Two Node Link单元模拟梁体与横向挡块碰撞。其中, 0# 台端侧墙与主梁碰撞刚度Kh0取2.3105kN/m; 过渡墩挡块与梁体碰撞刚度Kh1取1.14106kN/m; 4#、5# 和6# 墩挡块与梁体碰撞刚度Kh2取5.2105kN/m; 7# 台端背墙与梁体碰撞刚度Kh4取1.9105kN/m; 伸缩缝初始间隙取5cm。

4 力特性分析

MIDAS/Civil是桥梁设计与施工中最常用的软件, 可以对桥梁部件和整体进行精确的静力分析和施工阶段分析, 但在做抗震分析时其精确度就显得相对粗糙。OpenSees是一款专门针对地震分析的有限元分析软件, 可以精确地对结构进行动力时程分析, 但其不可视化使建模过程存在一定的风险。因此, 结合MIDAS/Civil的可视化功能和OpenSees的计算精确性等优点可以准确地进行桥梁的动力特性分析。

对此分别采用MIDAS/Civil和OpenSees分别建立全桥动力模型, 2种模型的前10阶自振周期和振型描述如表1所示, 定义周期差别率 R_w 为

$$R_w = \frac{T_M - T_O}{T_M} \times 100\%$$

式中, T_M , T_O 分别为采用MIDAS/Civil和OpenSees建立模型的自振周期。

表1 桥梁模型前10阶自振周期

振型编号	自振周期 (s)		周期差别率 (%)	振型描述
	T_M	T_O		
第1阶	4.10	3.91	4.58	主桥沿横桥向振动
第2阶	3.40	3.25	4.36	全桥沿纵桥向振动
第3阶	2.64	2.55	3.31	主桥沿横桥向二阶振动
第4阶	2.45	2.47	-0.76	引桥沿纵桥向振动
第5阶	1.83	1.86	-1.19	主桥与引桥沿纵桥向异向振动
第6阶	1.75	1.74	0.33	引桥沿横桥向振动

第7阶	1.72	1.70	1.25	主桥沿横桥向三阶振动
第8阶	1.61	1.61	0.43	引桥沿横桥向异向振动
第9阶	1.50	1.51	-0.68	主桥竖向振动, 引桥纵桥向振动
第10阶	1.48	1.48	0.53	引桥沿横桥向异向振动

注: T_M 表示MIDAS/Civil自振周期; T_O 表示OpenSees自振周期。

图5给出前10阶振型图。可以看出: 前10阶自振周期各阶最大周期差别率不超过5% (4.58%), 较好地证明了采用OpenSees建模的正确性。桥梁第1阶振型为横桥向且第1阶 T_O 为3.91s, 说明对主桥最容易激发的振型为横桥向, 对引桥最容易激发的振型为纵桥向。

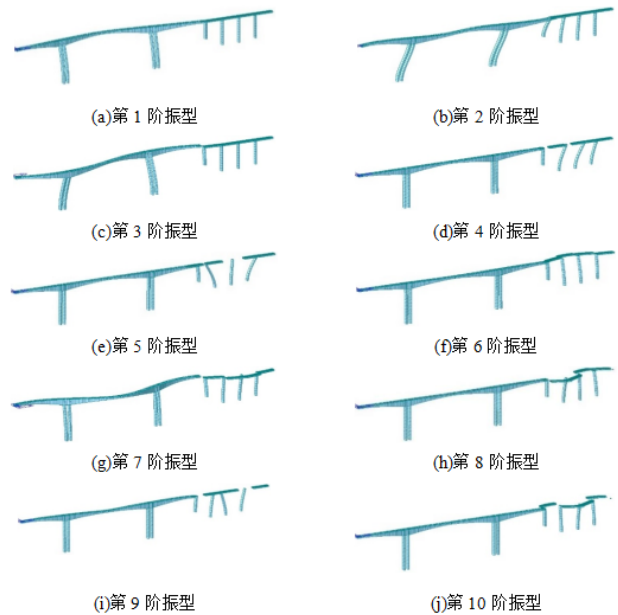


图5 前10阶振型图

5 结束语

大跨度连续刚构桥施工工艺复杂, 工期长, 施工期间结构自重、桥面铺装、预应力、施工荷载及收缩徐变等因素的影响不容忽视。本文以一座高墩大跨连续刚构桥为研究对象。采用MIDAS/Civil软件建立桥梁模型, 进行施工阶段模拟并进行分析, 再通过OpenSees建立精细化动力分析模型。进行施工阶段分析可以得到桥跨结构在施工阶段的薄弱位置, 对大跨度连续刚构桥主要为中跨跨中位置; 对比分析两种模型的前10阶周期, 验证OpenSees模型建立的准确性, 为施工阶段和成桥阶段高墩大跨连续刚构桥进行抗震分析提供准确的有限元软件模拟基础。

参考文献

- [1] 张永亮, 王云, 陈兴冲, 等. 双薄壁墩连续刚构桥地震反应影响参数分析[J]. 桥梁建设, 2018, 48(4): 17-21.
- [2] 李晰, 贾宏宇, 李倩. 近断层地震动作用下大跨度曲线刚构桥台阵试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(5): 200-207.
- [3] 宋飞, 李建中, 管仲国. 汶川地震百花大桥震害分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(8): 121-128.