

利用 ANSYS 模拟桥墩滞回性能的建模方法

司炳君¹, 孙治国², 王东升², 王清湘¹

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024;

2. 大连海事大学道路与桥梁工程研究所, 大连 116026)

摘要: 基于钢筋混凝土桥墩低周反复荷载试验结果, 利用 ANSYS 有限元分析软件, 建立了桥墩的有限元计算模型, 并对其进行了低周反复荷载试验下全过程的非线性有限元分析, 得到了桥墩的滞回曲线、骨架曲线以及桥墩在不同受力阶段的破坏形态。将计算结果与试验结果进行对比, 发现计算得到的桥墩滞回曲线和骨架曲线与试验结果吻合较好, 对于桥墩破坏形态的模拟, 也取得了比较理想的结果。

关键词: 钢筋混凝土; 桥墩; 有限元; 滞回特性; ANSYS 软件

中图分类号: U 442

文献标志码: A

文章编号: 1671-4431(2007)06-0076-04

Modeling Methods on Simulation of Hysteretic Behavior of Bridge Piers Based on ANSYS Software

SI Bing-jun¹, SUN Zhi-guo², WANG Dong-sheng², WANG Qing-xiang¹

(1. State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Based on the low-cycle reversed loading tests, three RC bridge piers were modeled with ANSYS software and the low-cycle reversed loading tests were non-linearly simulated. The hysteretic curves, skeleton curves, and the failure mode of the bridge piers in different experiment stages were obtained. The calculated hysteretic curves and skeleton curves were corresponding well with experimental results, the failure mode obtained by analysis were also agreed well with experimental results.

Key words: reinforced concrete; bridge piers; finite element; hysteretic behavior; ANSYS software

随着有限元分析手段的提高和计算能力的增强, 不少学者利用有限元方法对钢筋混凝土桥墩进行滞回特性的分析并取得了一定的成果。国外学者利用 ABAQUS、IDARC 软件、DIANA 有限元软件、CLEF 软件、FEAP 非线性有限元软件、ZeusNL 非线性有限元软件、PCLHEST 非线性有限元软件分别对钢筋混凝土桥墩在低周反复荷载下的滞回特性进行了比较成功的模拟分析^[1-8]。这些工作大多基于钢筋混凝土结构专用分析程序, 而目前大型通用有限元软件 ANSYS 已在土木工程领域获得了广泛应用, 因此作者利用 ANSYS 软件, 建立了钢筋混凝土桥墩的非线性有限元计算模型, 并对其进行了低周反复荷载下滞回性能的分析, 取得了较好的模拟效果。

1 桥墩拟静力试验方案

试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室结构分室进行, 共进行了 3 根桥墩的低周反复荷载试验, 分别为 A10、A12 和 A14 试件。试件尺寸及配筋情况如图 1 所示。

收稿日期: 2007-01-18.

基金项目: 国家自然科学基金(50308027)和海岸和近海工程国家重点实验室基金(LP0504).

作者简介: 司炳君(1971-), 男, 博士生, 讲师, E-mail: sibingjun@yahoo.com.cn

桥墩直径均为 400 mm, 净高 2 550 mm, 底部为试验时固定桥墩的台座; 试验加载方案采用力-位移混合控制, 每幅值循环 5 次; A10、A12、A14 桥墩的轴力分别为 600 kN、550 kN 和 500 kN, 试验过程中保持不变; 混凝土的抗压强度为 31 MPa; 钢筋的屈服强度: 箍筋为 273 MPa, $\Phi 10$ 纵筋为 362 MPa、 $\Phi 12$ 纵筋为 367 MPa、 $\Phi 14$ 纵筋为 399 MPa。

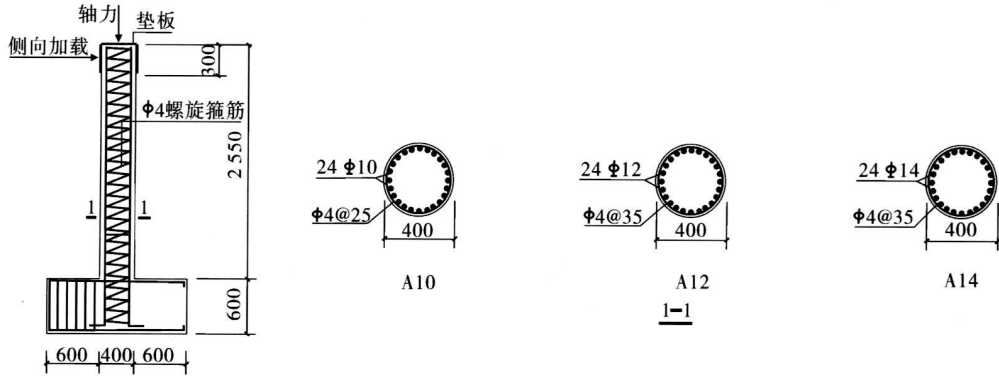


图1 桥墩设计详图

2 桥墩的有限元计算模型

1) 单元类型的选取 混凝土采用 Solid65 单元, 钢筋采用 Link8 单元模拟; 加载端的钢垫板采用 Solid45 单元模拟, 可有效避免加载点的应力集中现象^[9]。

2) 混凝土的本构关系和破坏准则 Solid65 单元破坏面为改进的 William-Warnke 五参数破坏曲面, 采用 Mises 屈服准则和多线性随动强化模型(KINH)^[10]; 混凝土等效单轴应力-应变关系式采用文献[11, 12] 建议的箍筋约束混凝土的本构关系, 并假定反复荷载下混凝土的应力-应变曲线的外包络线与等效单轴应力-应变曲线重合, 为了保证计算的收敛性, 未考虑混凝土受压应力-应变曲线的下降段; 混凝土的开裂采用 Rankine 最大拉应力准则, 当达到最大拉应力时混凝土即开裂, 拉应力松弛。当混凝土开裂后应变软化至 6 倍的开裂应变时, 应力降低为 0; 混凝土开裂后裂缝的剪力传递系数 β_1 取为 0.5, β_2 取为 0.95。

3) 钢筋的本构关系 钢筋采用双线性随动强化模型(BKIN), 假定总应力范围等于屈服应力的 2 倍, 已包含包辛格效应^[13]。其应力-应变关系则采用弹塑性的双斜线模型。

4) 桥墩的有限元网格划分 采用分离式的有限元模型, 因试件保护层为 10 mm, 有限元模型中未予考虑。桥墩试验模型中共有 24 根纵筋, 若每根纵筋分别建模, 则混凝土网格尺寸过小, 会导致计算难以收敛。经过比较分析, 将试验中的 24 根纵筋按等面积代换为 8 根纵筋, 沿桥墩截面周围均匀分布; 为了考虑有限元建模的方便, 同时保证桥墩的约束条件与原试验模型一致, 将试验中的长方形台座简化为一个周边完全约束住的圆台, 且圆台与试验台座等高。

3 有限元计算及分析

3.1 有限元加载过程及收敛的设置

按试验加载方案对桥墩进行低周反复荷载下滞回特性的有限元分析计算, 整个加载过程按施加位移控制, 以获得更好的收敛效果。采取以下加速收敛的措施: 关掉混凝土的压碎选项(即令混凝土单轴抗压强度为-1); 将每一个荷载步的荷载通过一系列的荷载子步逐步施加, 并多次调整荷载子步数进行试算; 将每个荷载子步的迭代次数限值增加为 50 次; 采用以力为基础的收敛准则, 收敛精度放宽为 5%; 打开自动时间分步与线性搜索选项等^[14-17], 所有计算均进行至试验加载过程全部完成或计算不能收敛为止。

3.2 桥墩滞回曲线及骨架曲线的模拟分析

计算完成后, 进入 ANSYS 的后处理界面, 利用 APDL 参数化设计语言编制的命令流提取位移加载点的反力及柱顶位移值, 即可得桥墩的滞回曲线。计算得到的桥墩滞回曲线及其骨架曲线与试验结果如图 2 和图 3 所示。

由图 2、图 3 可知, 计算结果与试验结果有较好的吻合; 但是在桥墩严重破坏阶段, 试验结果显示随着荷

载循环次数的增多,塑性铰区混凝土压碎脱落,纵筋屈曲,并引起桥墩侧向承载力的降低。而有限元分析得到滞回曲线和骨架曲线没有下降段,这与所建立的有限元模型无法模拟压碎混凝土的脱落和纵筋的屈曲有关^[2,18],在所建立的有限元模型中,为了保证反复加载下计算的收敛而关闭了混凝土的压碎选项,同时纵筋的建模采用 Link8 三维拉压杆单元,所以无法模拟纵筋的压屈。

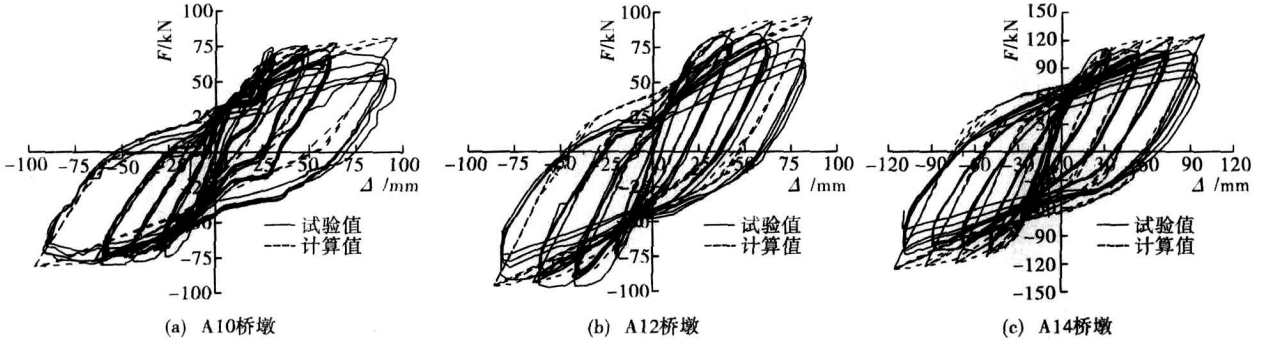


图2 计算所得桥墩滞回曲线与试验结果的对比

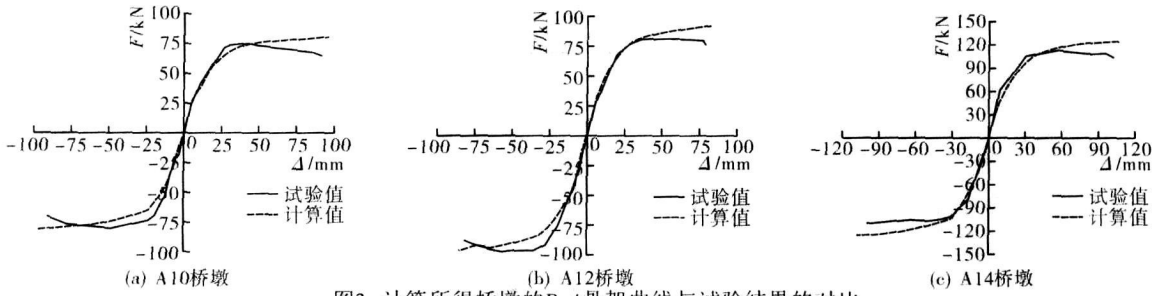


图3 计算所得桥墩的P-Δ骨架曲线与试验结果的对比

3.3 桥墩破坏形态的模拟

ANSYS 在其后处理中可以直观地显示混凝土单元应力和应变的大小及分布,显示混凝土的开裂和压碎破坏情况,当主拉应力超过混凝土抗拉强度时,混凝土在与主拉应力垂直的方向开裂,ANSYS 中以小圆圈显示 Solid65 单元的开裂破坏,且圆圈的法向方向与主拉应力的方向一致,若裂缝张开后又闭合,通过小圆圈中间加×表示。同时,在每个积分点处可以有至多 3 个开裂面,用小圆圈表示,圆圈越多则表示开裂越严重。

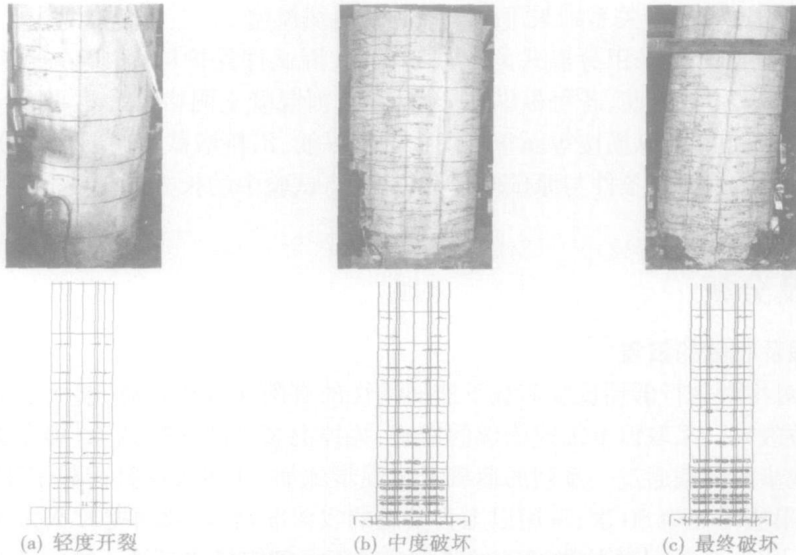


图4 计算所得A14桥墩破坏形态与试验结果对比

将计算得到的桥墩破坏形态与试验结果进行对比见图 4 所示,由于篇幅限制,只列出了 A14 桥墩的破坏形态,并与试验结果进行对比。有限元计算结果表明:在混凝土轻度开裂阶段(荷载控制阶段),混凝土的开裂范围一般可达 1 050 mm 高度;且此时小圆圈的个数较少,说明此时裂缝间距较大,裂缝较少;小圆圈的方向表明此时的开裂形态为桥墩两侧的水平弯曲裂缝;试验开裂图中显示此时混凝土开裂区域一般在 1 000 mm 的高度范围内,且裂缝分布稀疏,均为弯曲型裂缝。

在桥墩中度破坏阶段(位移控制为 60 mm 左右时), 计算结果显示 A14 桥墩的开裂范围可达 1 950 mm 高度, 上部开裂仍然为两侧的水平弯曲裂缝, 而底部 450 mm 高度范围内的小圆圈分布方向较乱且接近布满整个塑性铰区; 试验结果也显示此时桥墩的裂缝已达 1 600 mm 以上, 且上部裂缝基本沿水平方向开裂, 底部混凝土的开裂已非常严重, 300 mm 以下的裂缝已基本贯通, 斜裂缝交错。

在桥墩最终破坏阶段, 计算结果显示此时混凝土的开裂范围已不再增加, 且上部开裂变化不明显, 但底部混凝土的开裂加剧, 小圆圈已布满整个塑性铰区; 由试验现象可以看到, 此时桥墩开裂高度也基本不再上升, 桥墩的最主要破坏形态是底部 300 mm 高的范围内混凝土大片脱落, 纵筋屈曲, 形成塑性铰区。

计算结果与试验结果的对比可知, ANSYS 软件可以比较成功地模拟桥墩在低周反复荷载下的开裂区域、开裂方向以及混凝土开裂破坏的程度。

4 结 论

- a. 计算得到的桥墩滞回曲线和骨架曲线同试验结果有较好的吻合。
- b. 所建立的有限元模型可以较好地模拟桥墩在不同受力阶段的开裂区域和裂缝发展形态。

参考文献

- [1] Wan S Loh C H, Peng S Y. Experimental and Theoretical Study on Softening and Pinching Effects of Bridge Column[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21(1): 75-81.
- [2] Kw an W P, Billington S L. Simulation of Structural Concrete Under Cyclic Load[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(12): 1391-1401.
- [3] Girard C, Bastien J. Finite-element Bond-slip Model for Concrete Columns Under Cyclic Loads[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002, 128(12): 1502-1510.
- [4] Kim T H, Lee K M, Yoon C, et al. Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers Under Earthquake I: Theory and Formulation[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129(9): 1199-1207.
- [5] Kim T H, Lee K M, Yoon C, et al. Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers Under Earthquake II: Numerical Validation[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129(9): 1208-1219.
- [6] Kw an W P, Billington S L. Unbonded Posttensioned Concrete Bridge Piers I: Monotonic and Cyclic Analyses[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(2): 92-101.
- [7] Lee D H, Chot E, Zi G. Evaluation of Earthquake Deformation and Performance for RC Bridge Piers[J]. Engineering Structures, 2005, 27(10): 1451-1464.
- [8] Kim T H, Lee L M, Chung Y S, et al. Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns[J]. Engineering Structures, 2005, 27(4): 576-592.
- [9] Santhakumar R, Chandrasekaran E, Dhanara J R. Analysis of Retrofitted Reinforced Concrete Shear Beams Using Carbon Fiber Composites[J]. Electronic Journal of Structural Engineering, 2004, (4): 66-74.
- [10] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [11] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [12] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Observed Stress-strain Behavior of Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, 114(8): 1827-1849.
- [13] Hassan M, Sherif E T. Inelastic Dynamic Behavior of Hybrid Coupled Walls[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(2): 285-296.
- [14] Fanning P. Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams[J]. Electronic Journal of Structural Engineering, 2001, (2): 111-119.
- [15] Chansawant K. Nonlinear Finite Analysis of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates[D]. Corvallis: Oregon State University, 2003.
- [16] 陆新征, 江见鲸, 用 ANSYS Solid65 单元分析混凝土组合构件复杂应力[J]. 建筑结构, 2003, 33(6): 22-24.
- [17] Bae S J, Miseses A M, Bayrak O Z. Inelastic Buckling of Reinforcing Bars[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005, 131(2): 314-321.