

# 钢筋混凝土桥墩滞回性能的 有限元模拟分析

司炳君<sup>1</sup>, 孙治国<sup>2</sup>, 任晓丹<sup>3</sup>, 王东升<sup>2</sup>, 王清湘<sup>1</sup>

(1. 大连理工现代工程检测有限公司, 辽宁 大连, 116024, sbbingjun@yahoo.com.cn;

2. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连, 116026; 3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为研究利用 ANSYS 软件的钢筋混凝土结构滞回性能的有限元建模方法, 基于 3 个钢筋混凝土桥墩拟静力试验结果建立了桥墩滞回性能模拟的有限元计算模型, 进行了低周反复荷载下钢筋混凝土桥墩受全过程的有限元分析; 讨论了混凝土开裂的剪力传递系数、不同的强化模型和本构关系的选择对计算结果的影响。通过与试验结果对比, 得出结论: 建立的有限元模型可以较好的模拟反复荷载下桥墩的滞回曲线, 且计算结果对混凝土裂缝剪力传递系数、混凝土强化法则和本构关系的选取并不敏感; 文章最后对计算结果进行了初步的分析讨论。

**关键词:** ANSYS; 有限元; 钢筋混凝土桥墩; 滞回特性

**中图分类号:** U442 **文献标识码:** A **文章编号:** 0367-6234(2009)12-0105-05

## Finite element analysis of the hysteretic behavior of RC bridge piers

SI Bing-jun<sup>1</sup>, SUN Zhi-guo<sup>2</sup>, REN Xiao-dan<sup>3</sup>, WANG Dong-sheng<sup>2</sup>, WANG Qing-xiang<sup>1</sup>

(1. Dalian Modern Engineering Test CO. LTD., Dalian, Liaoning 116024, China, sbbingjun@yahoo.com.cn;

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

3. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** According to the quasi-static test results, three RC bridge piers were modeled with ANSYS software and the tests were non-linearly simulated to study the modeling methods on simulation of the hysteretic behavior of RC structures. The influences of shear retention coefficients, the hardening model and constitutive relations of concrete on the calculated results were discussed. It is found that the calculated hysteretic curves correspond well with experimental results, and the calculated results are not sensitive to the shear retention coefficients, hardening model and constitutive relations of the concrete. The calculated results were analyzed as well.

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

ANSYS 软件在混凝土结构有限元分析中具有很大的实用性、方便性, 国内外不少学者利用 ANSYS 软件中的 Solid65 单元, 对混凝土结构的低周反复荷载试验进行了模拟分析, 取得了一定的成果<sup>[1-8]</sup>。但是从目前的研究情况来看, 所进行

的模拟分析一方面是按照单调加载的方式进行<sup>[1-3]</sup>, 并将单调加载的计算结果与试验现象进行对比, 从而得出一定的结论; 而进行的滞回荷载的模拟<sup>[4-8]</sup>, 则主要集中于钢-混凝土组合结构<sup>[6-8]</sup>。

本文以进行的钢筋混凝土桥墩低周反复荷载试验结果为依据, 利用 ANSYS 软件, 建立了针对钢筋混凝土桥墩的非线性有限元计算模型, 对其进行了低周反复荷载下全过程的非线性有限元模拟分析, 同时讨论了不同的混凝土剪力传递系

收稿日期: 2006-05-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50308027, 50978042);  
地震行业科技专项资助项目(200808021).

作者简介: 司炳君(1971—), 男, 博士, 副教授;  
王清湘(1945—), 男, 教授, 博士生导师.

数、强化模型和本构关系的选择对模拟结果的影响,得出的结论可为利用 ANSYS 软件进行其他混凝土结构滞回性能的分析提供依据。

## 1 桥墩拟静力试验

共进行了 3 根桥墩试件的低周反复荷载试验,分别为 A10、A12 和 A14 号试件,设计桥墩均为受弯破坏形态,试件尺寸及配筋情况见图 1。

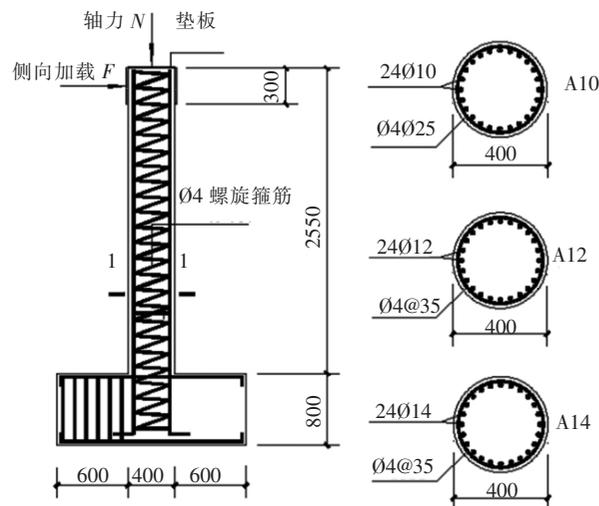


图 1 桥墩设计详图

桥墩直径均为 400 mm,净高 2400 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;荷载控制的 5 次循环是为了确定桥墩的实验屈服位移  $\Delta_y^{[9]}$ ;位移控制阶段,分别按屈服位移的 1、2、3、4、...、倍位移控制,直至侧向承载力降低到桥墩极限荷载的 80% 以下;A10 - A14 桥墩的轴力分别为 60、55 和 50 t,试验过程中保持不变;混凝土的抗压强度为 31 MPa;钢筋材料参数:箍筋为 8 号铁线,实测屈服强度 272 MPa,纵筋为 HRB335 钢筋,Φ10 纵筋实测屈服强度为 362 MPa、Φ12 纵筋为 366 MPa、Φ14 纵筋为 398 MPa。

## 2 有限元计算模型

混凝土采用 Solid65 单元,钢筋采用 Link8 单元模拟;对于加载端的钢垫板,采用 Solid45 单元模拟。

### 2.1 不同的有限元计算模型

#### 2.1.1 混凝土的本构关系和破坏准则

混凝土等效单轴应力-应变关系式采用 Mander 等人<sup>[10,11]</sup>建议的箍筋约束混凝土的本构关系,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,分别进行了考虑混凝土应力-应变关系下降段和未

考虑下降段两种情况的模拟。

Solid65 单元破坏面为改进的 William - Warnke 五参数破坏曲面,采用 Mises 屈服准则并分别选择多线性等向强化模型(MISO)和多线性随动强化模型(KINH)进行讨论<sup>[12]</sup>。

1) 等向强化(MISO):假定加载过程中屈服曲面均匀膨胀,没有畸变和移动,其数学表达式为

$$f(\sigma_{ij}, \kappa) = f_0(\sigma_{ij}) - k(\kappa) = 0. \quad (1)$$

式中:  $k(\kappa)$  为强化函数或者说是增函数,用来确定屈服曲面的大小,  $\kappa$  为一个强化参数,它的取值表示材料的加载历史。

2) 随动强化(KINH):随动强化法则假定在塑性变形的过程中,加载面在应力空间中只作刚体平动,没有转动,并且其大小和形状也保持不变。随动强化模型提供了考虑包兴格效应的简单方法,随动强化的屈服面一般表示为

$$f(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}) = f_0(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) - k = 0. \quad (2)$$

式中:  $k$  为常数,  $\alpha_{ij}$  为反应力,它给出了加载面中心的坐标。

#### 2.1.2 剪力传递系数的选择

Solid65 单元采用裂缝剪力传递系数  $\beta_t$ 、 $\beta_c$  表示裂缝面的情况,其值在 0 ~ 1 变化,0 表示开裂面光滑,不能传递剪力;1 表示裂缝面粗糙,没有剪力传递的损失。

已经进行的研究表明,当  $\beta_t$  的取值  $< 0.2$  时,会发生计算收敛的困难,因此  $\beta_t$  的取值一般都  $> 0.2$ <sup>[13]</sup>。文献[14]指出,如果两个系数相差太大,会因应力集中现象严重而导致计算难以收敛。笔者曾按照  $\beta_t = 0.5$ ,  $\beta_c = 0.95$ ;  $\beta_t = 0.2$ ,  $\beta_c = 0.5$  两组不同的数值进行试算,结果发现所得的桥墩荷载-位移滞回曲线几乎是一样的。即对于所建立的有限元模型,不同的剪力传递系数的取值仅会影响计算的收敛性,但对于桥墩滞回曲线的模拟结果没有明显影响。本次计算中所有模型均取  $\beta_t = 0.5$ ,  $\beta_c = 0.95$ 。

#### 2.1.3 钢筋的本构关系

钢筋采用双线性随动强化塑性本构模型(BKIN),假设总应力范围等于屈服应力的 2 倍,以包含包辛格效应<sup>[15]</sup>。本构关系则采用弹塑性的双斜线模型。

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y; \quad (3.1)$$

$$\sigma_s = f_y + (\varepsilon_s - \varepsilon_y) E'_s, \quad \varepsilon_s > \varepsilon_y. \quad (3.2)$$

综上所述,共建立了 4 种有限元计算模型,分别考虑了混凝土不同的强化法则和受压应力-应变曲线有无下降段对计算结果的影响,模型见表 1。

表 1 不同的有限元计算模型

模型	强化模型	混凝土 $\sigma - \epsilon$
A	KINH	无下降段
B	KINH	有下降段
C	MISO	无下降段
D	MISO	有下降段

2.2 桥墩的有限元网格划分

采用分离式的有限元模型,未考虑混凝土保护层的影响.利用 ANSYS 软件进行混凝土结构的有限元分析,当单元尺寸过小时,不仅会造成计算时间的浪费,还会因应力集中现象严重而使计算过早不能收敛,为了有效避免这个问题,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,与之相对应的则是每个圆截面上共划分为 12 个混凝土单元<sup>[16]</sup>.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(图 2).桥墩的有限元网格划分见图 2 所示,有限

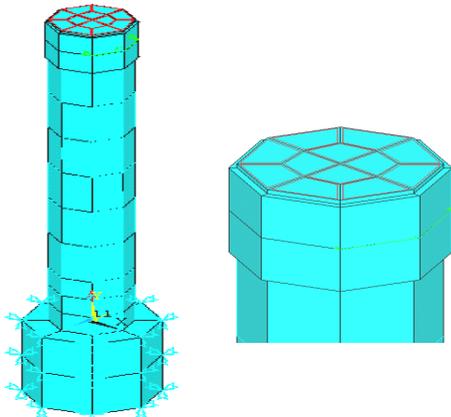


图 2 桥墩的有限元计算模型

元模型中共有 172 个 Solid65 单元,168 个 Link8 单元,28 个 Solid45 单元,可以看出,本模型中混凝土的单元尺寸是比较大的.

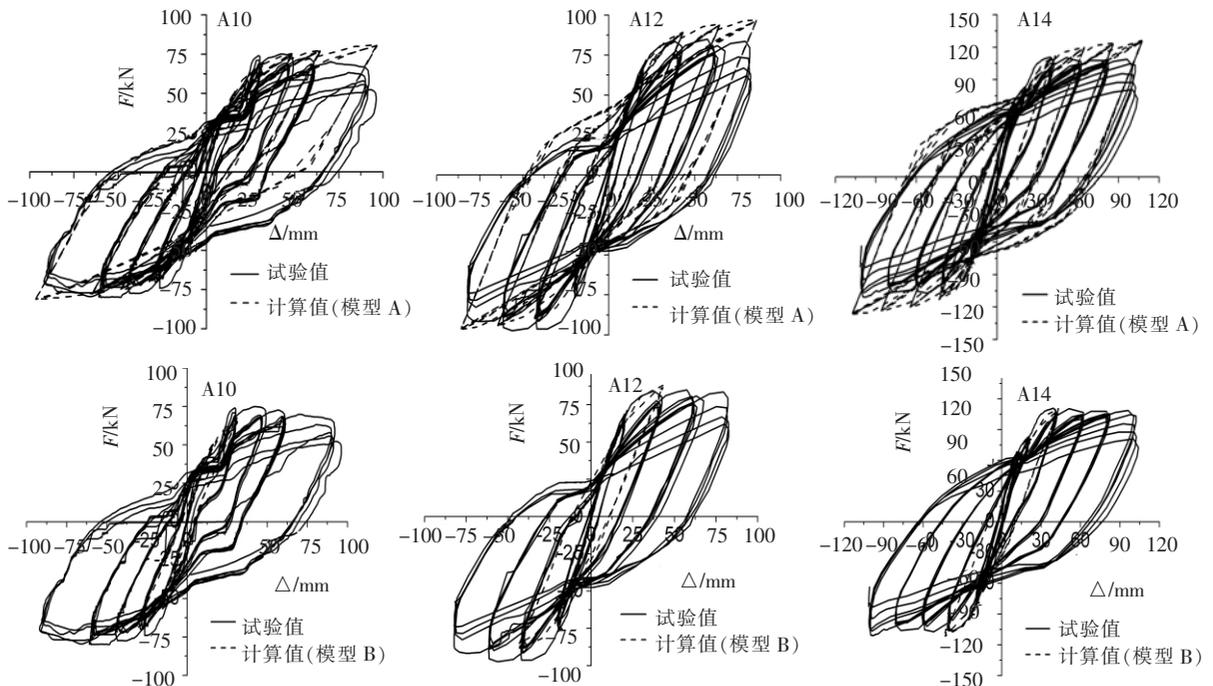
3 计算结果及对比分析

按照不同的有限元计算模型分别对桥墩进行低周反复荷载作用下的有限元分析,所有模拟均进行至加载过程全部完成或计算不能收敛为止,得到的桥墩滞回曲线与试验结果的对比如图 3 所示.

将不同计算模型的计算结果与试验结果进行对比可知,在桥墩严重破坏以前,除模型 B 因计算不能收敛而无法与试验结果进行对比外,其余的三种有限元模型均能对低周反复荷载作用下桥墩的荷载 - 位移滞回曲线进行较好的模拟.但是在桥墩严重破坏阶段(最后一个位移控制下进行的 5 次滞回循环),因建立的有限元模型无法反映压碎混凝土的脱落和纵筋的屈曲<sup>[17-18]</sup>,难以模拟桥墩在反复荷载下强度和刚度的退化.

B 与 D 有限元计算模型中,虽然考虑了混凝土受压的应力 - 应变关系的下降段,但是,计算得到的桥墩荷载 - 位移滞回曲线仍没有下降的趋势,也没有反映出混凝土强度和刚度随荷载循环次数的增多而退化的趋势.且输入下降段后,计算比没有输入下降段时(A 与 C 模型)更难以收敛.

将按照不同混凝土强化准则计算出的滞回曲线进行对比,可以发现,无论是选用随动强化还是等向强化模型,计算得到的桥墩荷载 - 位移滞回曲线几乎没有区别.



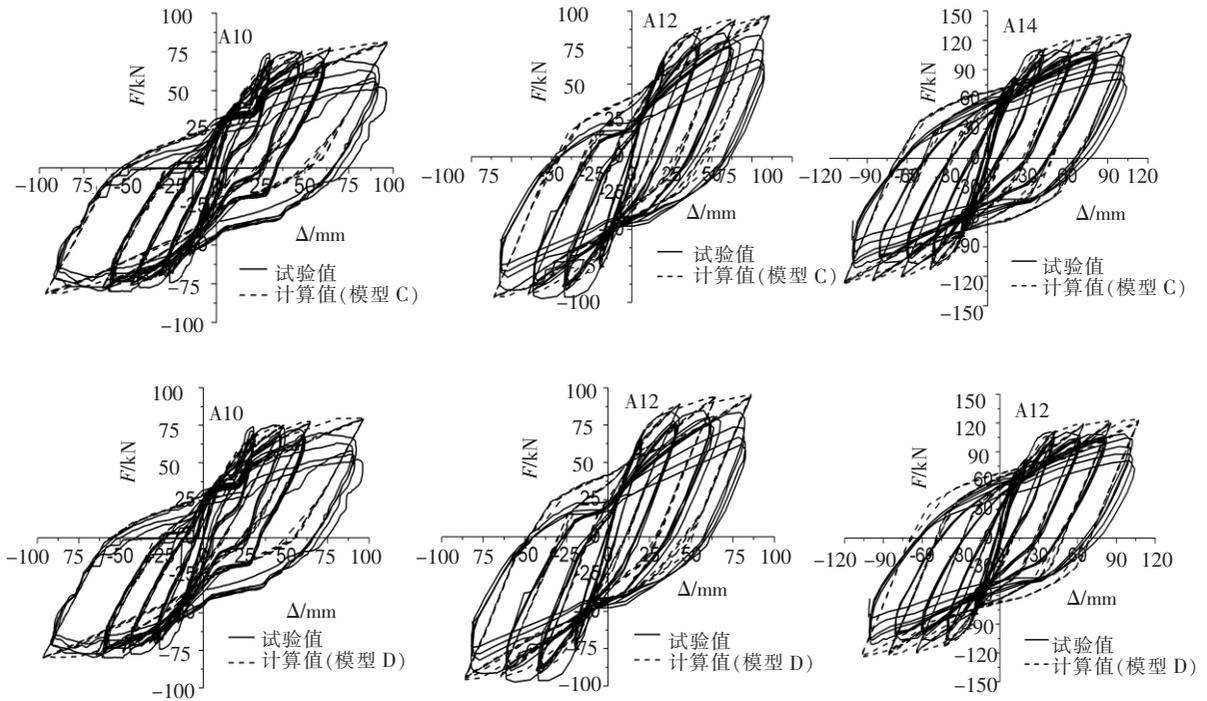


图 3 桥墩滞回曲线的对比

### 4 讨论

#### 4.1 关于混凝土 $\sigma - \epsilon$ 曲线的下降段

在混凝土结构的有限元分析中,当输入混凝土受压应力 - 应变曲线的下降段后易导致计算收敛的困难.在本次建立的有限元模型的分析中也可以看到,考虑混凝土  $\sigma - \epsilon$  曲线的下降段并选用随动强化模型时,计算收敛变的很困难.但从滞回曲线计算结果看,是否考虑混凝土受压应力 - 应变曲线的下降段对计算结果影响不大,分析可能有以下原因:

1) 由于采用的是箍筋约束混凝土的本构关系,其下降段本身比较平缓,即使混凝土已经超过峰值应力,其应力值并没有明显的降低.

2) 模型中混凝土单元尺寸较大,有限元计算时,在混凝土的一个单元内对应力进行平均,降低了应力值,使得超过峰值应力的混凝土单元较少,从而造成混凝土  $\sigma - \epsilon$  曲线的下降段对计算结果影响不大.

#### 4.2 不同的混凝土强化模型

国内外在反复加载的分析过程中对于混凝土一般都会采用随动强化模型,因为这种模型能够体现包辛格效应,比等向强化更加接近实际情况<sup>[19]</sup>.但是对于本例中分析的构件,我们通过计算结果的对比可以看出,混凝土选用等向强化模

型和随动强化模型计算得出的结果并没有明显区别,分析可能有以下原因: 1) 混凝土材料实质上是一种软化材料,其应力应变曲线进入塑性区段后,强化段的塑性应变非常有限,很快就进入软化段,上述两种强化准则只适用于进入塑性区域后有限的强化段,这就限制了强化准则对最终计算结果的影响,也就使得不同强化准则的区别不明显. 2) 由于本算例取的混凝土计算网格比较粗,相当于在较大的区域内对应力作了平均处理,这就在局部抹平了应力梯度,使得混凝土塑性的发展更加有限,这也会导致强化法则对最终计算结果的影响不大.

### 5 结论

1) 利用 ANSYS 软件建立的钢筋混凝土桥墩有限元计算模型,可以对桥墩在低周反复荷载作用下的滞回曲线进行较好的模拟.

2) 针对本次进行的有限元模拟,是否考虑混凝土受压应力 - 应变曲线的下降段,对计算得到的荷载 - 位移滞回曲线没有很大影响,但是考虑下降段时会造成计算收敛的困难.

3) 针对本次进行的有限元模拟,混凝土选用随动强化模型或等向强化模型对荷载 - 位移滞回曲线影响不大.

## 参考文献:

- [1] ERDURAN E, YAKUT A. Drift based damage functions for reinforced concrete columns [J]. Computers and Structures, 2004, 82(2-3): 121-130.
- [2] 肖建庄, 龙海燕, 石雪飞. 纤维布加固高轴压混凝土柱抗震性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(8): 990-995.
- [3] 曹万林, 黄选明, 宋文勇, 等. 带交叉钢筋异形截面短柱抗震性能试验研究及非线性分析[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 30-37.
- [4] 张国军. 大型火力发电厂高强混凝土框架柱的抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- [5] 黄丽蒂, 李惠. 耗能低剪力墙的非线性有限元全过程分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(11): 1456-1459.
- [6] 王来, 王铁成, 齐建伟, 等. 方钢管混凝土框架滞回性能试验与理论研究[J]. 天津大学学报, 2005, 38(1): 41-46.
- [7] 李玉荣, 沈金, 裘涛, 等. 型钢混凝土梁式转换节点抗震性能研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(1): 96-102.
- [8] 周学军, 曲慧. 方钢管混凝土抗梁柱节点在低周反复荷载作用下的抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(1): 38-42.
- [9] Priestley M J N, Park R. Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading, ACI Structural Journal, 1987, 84(8): 51-76.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] ANSYS Inc. ANSYS User's Manual for Revision 5.7 [M]. Pittsburgh, Pennsylvania: ANSYS Inc., 2001.
- [13] DAMIAN K, THOMAS M, SOLOMON Y. Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates [R]. Salem: Report for Oregon Department of Transportation, 2001.
- [14] 张子潇, 叶列平, 陆新征. U型FRP加固钢筋混凝土梁受剪剥离性能的有限元分析. 工程力学, 2005, 22(4): 155-162.
- [15] HASSAN M, SHERIF E T. Inelastic dynamic behavior of hybrid coupled walls [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(2): 285-296.
- [16] HU H T, HUANG C S, WU M H, et al. Nonlinear analysis of axially loaded Concrete-filled tube columns with confinement effect [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129(10): 1322-1329.
- [17] KWAN W P, BILLINGTON S L. Simulation of structural concrete under cyclic load [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(12): 1391-1401.
- [18] BAE S J, MIESES A M, BAYRAK O Z. Inelastic buckling of reinforcing bars [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005, 131(2): 314-321.
- [19] CHEN W F. Plasticity in reinforced concrete [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1982. [20] ZIENKIEWICZ O C, TAYLOR K L. The finite element method [M]. Fifth Edition. 北京: 世界图书出版公司, 2005.

(编辑 姚向红)