

# 单调加载方式下桥墩的有限元建模方法研究<sup>\*</sup>

孙治国 王东升

(大连海事大学 道路与桥梁工程研究所 大连 116026)

司炳君

(大连理工大学 土木水利学院 大连 116024)

**摘要:** 基于钢筋混凝土桥墩低周反复荷载试验结果, 利用 ANSYS 软件, 建立了单调加载方式下桥墩的有限元计算模型, 讨论了不同的混凝土本构关系和有限元求解方法对计算结果的影响, 并将模拟得到的桥墩屈服荷载、极限荷载以及荷载—位移曲线与试验结果进行了对比。结果发现, 采用约束混凝土的本构关系可得到更好的收敛效果, 但弧长法求解对收敛性影响不大; 所建立的有限元模型可以较好的模拟桥墩的屈服荷载和极限荷载。

**关键词:** 桥墩 ANSYS 软件 有限元

## RESEARCH ON THE FINITE ELEMENT MODEL OF BRIDGE PIERS UNDER MONOTONIC LOADING

Sun Zhiguo Wang Dongsheng

(Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University Dalian 116026)

Si Bingjun

(School of Civil & Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology Dalian 116024)

**Abstract:** Based on the low-cycle reversed loading tests, different finite element models of the piers under monotonic loading are presented. The effects of different concrete constitutive relationships and solution methods on simulated results are discussed. Also, the calculated yield loads, ultimate loads and load-displacement curves of the piers are compared with experimental results. It is proved that a better convergence result can be obtained by using confined concrete model, but it is difficult to obtain a better result by using arc-length solution method. The calculated yield loads and ultimate loads are corresponding well with experimental ones.

**Keywords:** bridge piers ANSYS software finite element method

### 0 引言

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, 并取得了不少成果。从目前的研究情况来看, 所进行的模拟分析大部分是按照单调加载的方式进行, 将计算得到的结构的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载、荷载—位移曲线以及破坏形态等与反复加载的试验结果对比, 从而得出一定的结论<sup>[1-4]</sup>。

本文是在已经完成的钢筋混凝土桥墩低周反复荷载试验的基础上, 利用 ANSYS 软件, 建立了单调加载方式下钢筋混凝土桥墩的有限元计算模型, 并

对其进行了有限元模拟分析。主要探讨以下问题:

- 1) 对于所建立的桥墩有限元模型, 不同的混凝土本构关系和求解方法对计算结果的影响。
- 2) 将计算得到的桥墩屈服荷载、极限荷载以及桥墩的荷载—位移曲线与试验结果进行对比, 验证有限元计算模型的正确性。

### 1 有限元模型的建立

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助项目(50308027); 海岸和近海工程国家重点实验室主任基金资助项目(LP0504)。

第一作者: 孙治国 男 1980年2月出生 硕士

收稿日期: 2007-10-14

## 1.1 单元类型的选取

根据三根钢筋混凝土桥墩(A10, A12和A14)低周反复荷载试验结果,分别建立了不同的有限元计算模型,试验详见文献[5],这里不再赘述。

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,则采用Solid45单元模拟;钢筋与混凝土之间的粘结滑移关系采用Combin39单元模拟。

混凝土单轴受压应力-应变关系式分别采用Mander等人<sup>[6-7]</sup>建议的箍筋约束混凝土的本构关系和过镇海<sup>[8]</sup>建议的混凝土受压应力-应变关系曲线进行对比;混凝土开裂后张开裂缝的剪力传递系数 $\beta_r$ 和闭合裂缝的剪力传递系数 $\beta_c$ 分别取为0.5和0.95。

钢筋应力-应变关系采用弹塑性的双斜线模型,钢筋与混凝土之间的粘结滑移模式采用Nilson建议的公式<sup>[9]</sup>。

当混凝土单轴受压的 $\sigma-\epsilon$ 曲线采用约束混凝土的本构关系时,由于其下降段比较平缓,使用牛顿-拉普森非线性求解方法即可求得很好的收敛解;当采用非约束混凝土的本构关系时,由于混凝土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线下降段变的很陡,这时负刚度矩阵的出现会导致计算收敛非常困难,我们分别采用牛顿-拉普森求解方法和弧长法进行求解,讨论不同的求解方法对计算结果的影响。

综上所述,对于每一个钢筋混凝土桥墩,根据选择的混凝土本构关系和非线性求解方法的不同,可分为三种有限元模型,分别为模型A、模型B和模型C,不同计算模型的介绍见表1所示。

表1 不同的有限元计算模型

模型	混凝土模型	求解方法
A	Mander	牛顿-拉普森
B	过镇海	牛顿-拉普森
C	过镇海	弧长法

## 1.2 桥墩的有限元网格划分

所建立的钢筋混凝土桥墩的有限元模型见图1所示,采用分离式的有限元模型。对于钢筋与混凝土之间的粘结滑移关系,沿钢筋切线方向,在钢筋节点与混凝土节点之间建立Combin39单元来模拟;沿钢筋法向,将钢筋和混凝土节点位移耦合,没有滑移关系。模型中共有2640个Solid65单元,1032个Link8单元,156个Solid45单元,552个Combin39单元。

## 1.3 有限元求解和收敛的设置

侧向加载过程按施加位移控制,以获得更好的

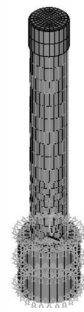


图1 桥墩的有限元计算模型

收敛效果,采取了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),防止因混凝土的压碎破坏导致计算过早不能收敛;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,以获得更好的收敛结果;采用以力为基础的收敛准则,收敛精度放宽为5%。

使用牛顿-拉普森求解方法时,打开自动时间分步与线性搜索选项,将每个荷载子步的迭代次数限值增加为50次;而采用弧长法求解时,则关闭自动时间分步和线性搜索,关闭预测选项,关闭自适应下降功能和时间积分效应;所有计算均进行至位移全部施加完毕或计算不能收敛为止<sup>[10]</sup>。

## 2 有限元计算结果及分析

### 2.1 计算的荷载-位移曲线同试验骨架曲线对比

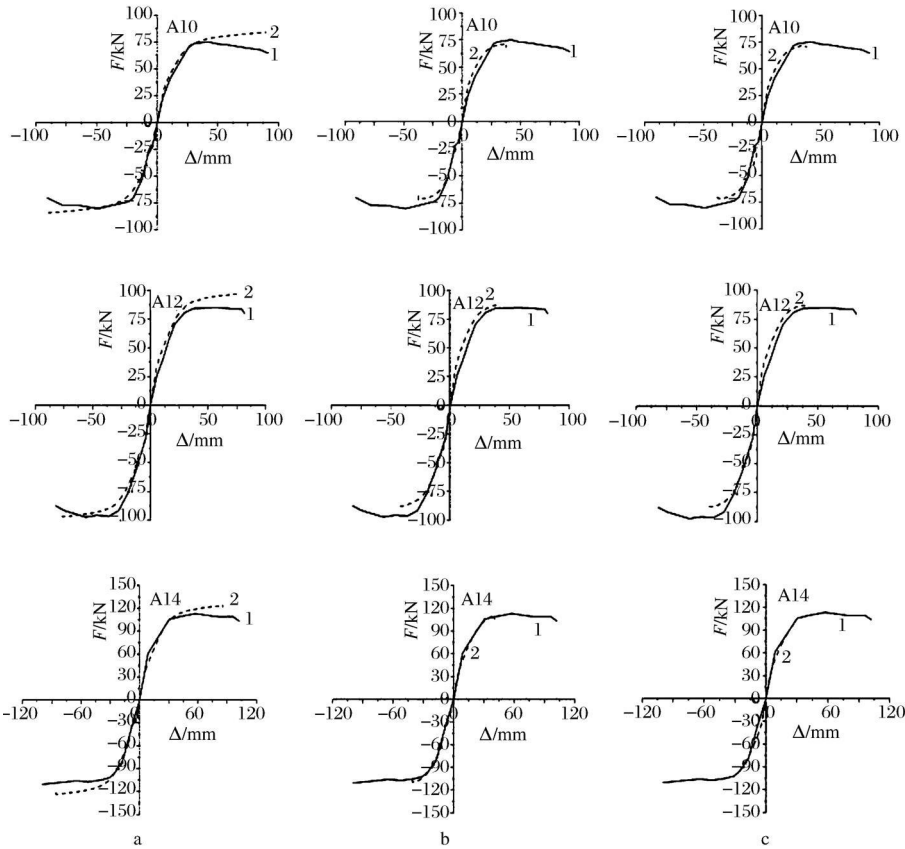
为与试验结果进行对比,对桥墩的有限元模型进行了正反两个方向加载过程的模拟,将每根桥墩分别按照三种有限元模型计算得到的荷载-位移曲线同桥墩低周反复加载试验的 $P-\Delta$ 骨架曲线进行对比如下:

计算得到的荷载-位移曲线与试验结果的对比可以看出,在达到极限承载力之前,采用不同的有限元计算模型,计算结果与试验结果均有很好的吻合,即采用不同的混凝土本构关系和求解方法都可以对桥墩从开始加载到极限承载力阶段的荷载-位移曲线进行很好的模拟;采用约束混凝土的本构关系时,有限元模型均能计算至位移全部施加完毕,但是,计算得到的荷载-位移曲线没有下降段,这是与试验结果不符,且计算得到的桥墩的极限承载力比试验值偏高;采用非约束混凝土的本构关系时,所有计算均进行至极限承载力附近时便不能收敛,即使采用弧长法求解,仍然难以得到好的收敛结果。

不同的有限元计算模型计算出的桥墩极限承载力与试验结果的对比见表2所示,由表中可以看出,采用约束混凝土的本构关系时,计算得到的结果偏

大,但无论哪种有限元计算模型,计算得到的极限承载力与试验结果的误差均在 15% 以内,即所建立的

有限元模型可以对桥墩的极限承载力进行较准确的模拟。



a—模型 A; b—模型 B; c—模型 C

1—试验值; 2—计算值

图 2 桥墩的 P—Δ 曲线的对比

表 2 计算极限荷载与试验结果的对比

桥墩	模型	试验 / kN	计算 / kN	计算 / 试验
A10	A	75	84.1	1.12
		-79.9	-84.1	1.05
		75	71.9	0.96
	B	-79.9	-71.9	0.90
		75	71.8	0.96
		-79.9	-71.8	0.90
A12	A	85	96.8	1.14
		-96	-96.8	1.01
		85	87.9	1.03
	B	-96	-87.9	0.92
		85	87	1.02
		-96	-87	0.91
A14	A	108.9	123.6	1.13
		-110.5	-123.6	1.12
		108.9	109.5	1.01
	B	-110.5	-109.5	0.99
		108.9	97.1	0.89
		-110.5	-97.1	0.88

## 2.2 屈服荷载的对比

在所建立的有限元模型中,定义第一根纵筋屈服时对应的荷载值为计算屈服荷载,将有限元计算

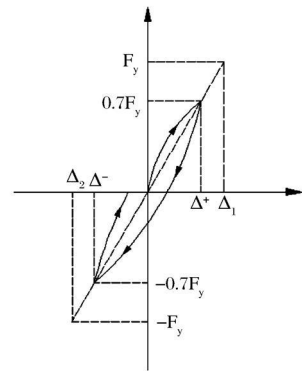


图 3 试验屈服位移的确定

结果中每个荷载子步的钢筋应力值提取,即可得出钢筋应力随荷载的变化情况,从而找出桥墩的计算屈服荷载值。

同时,根据试验结果得出的试验屈服位移按下方法计算<sup>[11]</sup>:

屈服位移  $\Delta_y$  按下式计算:

$$\Delta_y = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \quad (1)$$

$$\Delta_1 = \frac{F_y}{K_1} \quad (2)$$

$$\Delta_2 = \frac{F_y}{K_2} \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{0.7F_y}{\Delta^+} \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{-0.7F_y}{\Delta^-} \quad (5)$$

$F_y$  为桥墩的理论屈服荷载, 试验前根据混凝土和钢筋的强度由纤维单元模型计算得出, 桥墩试验时, 初始加载阶段按  $0.7F_y$  进行五个滞回的循环, 并记录下正向和反向最大荷载时对应的位移值,  $\Delta^+$  和  $\Delta^-$  分别为五个滞回循环对应的最大位移值的算术平均值, 从而计算出桥墩的试验屈服位移。

试验时的第二次滞回按屈服位移  $\Delta$  控制, 屈服位移对应的荷载值即为试验屈服荷载, 将有限元分析得到的计算屈服荷载同试验屈服荷载进行的对比见表 3 所示, 可以看出, 有限元计算得出的桥墩屈服荷载比试验定义的屈服荷载值偏大, 但误差在 15% 以内。

表 3 试验屈服荷载与计算屈服荷载的对比

桥墩	试验 / kN	计算 / kN	计算 / 试验
A10	60	62.57	1.04
	-60	-62.57	1.04
A12	67.76	77.2	1.14
	-73.7	-77.2	1.05
A14	82.2	91.4	1.11
	-80	-91.4	1.14

### 3 结论

本文在已进行的钢筋混凝土桥墩低周反复荷载试验的基础上, 建立了基于单调加载方式的桥墩有限元计算模型, 并对其进行了有限元分析计算, 讨论了不同的混凝土本构关系和有限元求解方法对计算结果的影响; 同时计算了桥墩的屈服荷载、极限荷载以及荷载-位移曲线, 在与试验结果进行对比的基础上, 主要得出以下结论:

1) 采用不同的混凝土本构关系和求解方法都可

(上接第 275 页)

由以上结果可以看出, 裂缝的方向性在曲率模态研究中不宜忽略, 它不仅影响曲率模态曲线的形状, 其方向敏感性对损伤研究的另一主题——损伤定位有更重要的实际意义。

### 4 结论与展望

结构损伤识别参数与结构损伤类型及损伤情况不能较好对应一直是存在于损伤识别领域内的一个问题。所以, 在发展已有识别技术或开发新的识别

以对桥墩从初始加载到极限承载力阶段的荷载-位移曲线进行很好的模拟; 采用约束混凝土的本构关系时, 有限元模型均能计算至位移全部施加完毕, 但是, 计算得到的荷载-位移曲线没有下降段, 且计算得到的桥墩的极限承载力比试验值偏高; 采用非约束混凝土的本构关系时, 当计算进行至极限承载力附近时便不能收敛。

2) 无论哪种有限元计算模型, 计算得到的极限承载力与试验结果的误差均在 15% 以内, 所建立的有限元模型可以对桥墩的极限承载力进行较准确的模拟分析。

3) 有限元计算得出的桥墩屈服荷载比试验定义的屈服荷载值偏大, 但误差在 15% 以内。

#### 参考文献

- 1 Erduran E, Yakut A. Drift Based Damage Functions for Reinforced Concrete Columns. *Computers and Structures*, 2004, 82 (2-3): 121 - 130
- 2 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. *建筑结构学报*, 2005, 26(3): 30-37
- 3 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. *同济大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(8): 990-995
- 4 张国军, 刘伯权, 白国良. 钢筋混凝土框架柱的三维有限元模拟分析. *同济大学学报*, 2005, 33(8): 995-1000
- 5 孙治国. 基于 ANSYS 的桥梁极限承载力和滞回特性研究. [硕士学位论文] 大连: 大连理工大学, 2006
- 6 Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical Stress-strain Model for Confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1988, 114 (8): 1804-1826
- 7 Mander J B, Priestley M J N, Park R. Observed Stress-strain Behavior of Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1988, 114(8): 1827-1849
- 8 过镇海. 混凝土的强度和本构关系—原理与应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004
- 9 Nilson A H. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element method. *ACI Journal*, 1968, 65(9): 757-766
- 10 司炳君, 孙治国, 艾庆华. Solid65 单元在混凝土结构有限元分析中的应用. *工业建筑*, 2007, 37(1): 87-92
- 11 Ghee A B, Priestley M J N, Paulay T. Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns. *ACI Structural Journal*, 1989, 86(1): 45-59

参数研究时, 笔者认为, 应尽可能的考虑与实际损伤类型的联系, 这是理论在实际中能应用到应用的一个必要条件, 也是推动损伤识别研究的重要因素。

#### 参考文献

- 1 Abdel Wahab M M, De Roeck G. Damage Detection in Bridges Using Modal Curvatures: Application to A Real Damage Scenario. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 226(2): 217-235
- 2 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用. 北京: 科学出版社, 2001
- 3 高芳清, 金建明, 高淑英. 基于模态分析的结构损伤检测方法研究. *西南交通大学学报*, 1998, 33(1): 108-113