

文章编号:1673-2049(2012)03-0061-07

# 后张预应力预制桥墩抗震解析计算方法

布占宇<sup>1</sup>, 谢旭<sup>2</sup>, 丁勇<sup>1</sup>, 黄剑源<sup>1</sup>

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:**研究了后张预应力预制桥墩的抗震解析计算方法,以 2 种不同连接方式的预制桥墩拟静力试验为背景,基于关键截面轴力和弯矩平衡及桥墩墩底整体弯矩平衡,推导出了预制桥墩水平力-相对位移关系计算过程,研究了耗能钢筋配筋率、高宽比对预制桥墩抗震性能的影响。结果表明:解析计算结果和纤维模型计算结果与拟静力试验结果基本一致,解析计算方法可以代替纤维模型方法进行预制桥墩抗震性能计算。

**关键词:**预制桥墩;后张预应力;抗震;解析计算方法;抗压强度

**中图分类号:**U443.22 **文献标志码:**A

## Analytical Calculation Method of Seismic Resistant Response for Posttensioned Precast Bridge Piers

BU Zhan-yu<sup>1</sup>, XIE Xu<sup>2</sup>, DING Yong<sup>1</sup>, HUANG Jian-yuan<sup>1</sup>

(1. School of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

**Abstract:** Under the background of pseudo static test of precast bridge piers with two kinds of connection manners, the seismic resistant analytical calculation method of posttensioned precast bridge piers was investigated. The calculation process of lateral force-displacement relation was deduced based on critical sectional axial load and bending moment equilibrium and entire bending moment balance at column base. The influences of reinforcement ratio of energy dissipation bars and height-width ratio on the seismic resistant behaviors of precast bridge piers were discussed. The results indicate that the analytical calculation results and fibre model results are in accordance with pseudo static test results, the analytical calculation method can substitute for fibre model in the calculation of precast bridge pier seismic resistant behavior.

**Key words:** precast pier; posttensioned tendon; seismic resistant; analytical calculation method; compressive strength

## 0 引言

构件预制化是桥梁结构未来的一个发展方向,通过把大部分现场施工过程转移到预制工厂,可以

加快施工进度、减少建筑垃圾污染、缓解施工期交通拥堵、降低车辆尾气排放、提高施工质量、提高工人施工安全、降低寿命周期费用等<sup>[1-2]</sup>。虽然预制箱梁等预制上部结构构件的设计和应用已比较成熟,预

收稿日期:2012-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51208268);浙江省科技厅公益技术研究工业项目(2011C21078);

宁波市科技局社会发展科研项目(2011C50017);宁波大学科研项目(XYL12002)

作者简介:布占宇(1977-),男,山东聊城人,讲师,工学博士,E-mail:buzhanyu@yahoo.com.cn。

制桥墩等下部结构的设计和应用还较少,特别是在高烈度地区,由于对预制桥墩的抗震性能不是十分了解,限制了其进一步的应用<sup>[3-5]</sup>。

本文中笔者主要研究后张预应力预制桥墩拟静力试验的解析计算方法,基于墩底关键截面的弯矩-曲率分析,推导出了墩顶水平力-相对位移计算过程,并利用 OpenSees 开源程序建立预制桥墩纤维模型,通过与 2 个后张预应力预制桥墩拟静力试验结果的对比验证了解析方法的正确性,重点研究了耗能钢筋配筋率和高宽比对桥墩抗震性能的影响。

## 1 材料模型

### 1.1 混凝土

混凝土材料用 Kent-Scott-Park 模型模拟,形式简单且计算精度高。最初由 Park 等<sup>[6]</sup>提出,后经 Scott 等<sup>[7]</sup>改进。应力-应变关系由 3 个部分组成:抛物线上升部分、线性下降部分、水平部分。混凝土应力-应变关系可以表示为

$$\sigma_c = \begin{cases} K f'_c \left[ 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^2 \right] & \epsilon_c < \epsilon_{c0} \\ K f'_c \left[ 1 - Z_i (\epsilon_c - \epsilon_{c0}) \right] & \epsilon_{c0} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_u \\ 0.2 K f'_c & \epsilon_c > \epsilon_u \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_c$  为混凝土应力;  $\epsilon_c$  为混凝土受压边缘的混凝土应变;  $K$  为考虑箍筋约束作用的混凝土强度增大系数;  $f'_c$  为混凝土抗压强度;  $\epsilon_u$  为混凝土强度下降至顶点处 20% 时的应变;  $Z_i$  为应变软化斜率,  $Z_i = 0.5 / \left( \frac{3 + 0.29 f'_c}{145 f'_c - 1000} + 0.75 \rho_s \sqrt{\frac{h'}{s_h}} - 0.002 K \right)$ ,  $i=1, 2$ ,  $i=1$  和  $\rho_s=0$  表示无约束混凝土,  $i=2$  和  $\rho_s \neq 0$  表示约束混凝土;  $\epsilon_{c0}$  为截面受压边缘混凝土最大应力时对应的应变,  $\epsilon_{c0} = 0.002 K$ ,  $K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c}$ ,  $\rho_s$  为箍筋体积配筋率,  $h'$  为箍筋外侧包围的核心混凝土宽度,  $s_h$  为箍筋层间距,  $f_{yh}$  为箍筋屈服强度。

混凝土拉应力假定为 0, 模拟接缝的张开, 并且对节段内部混凝土响应的影响较小。图 1(a) 中给出了典型的约束和无约束混凝土单调加载应力-应变曲线。

### 1.2 耗能钢筋

根据钢筋单向拉伸试验结果, 耗能钢筋应力-应变关系假定符合三线性弹塑性模型, 如图 1(b) 所示, 钢筋应力可以从任何给定的钢筋应变求得。

### 1.3 预应力筋

预应力筋假定符合双线性弹塑性模型, 图 1(c)

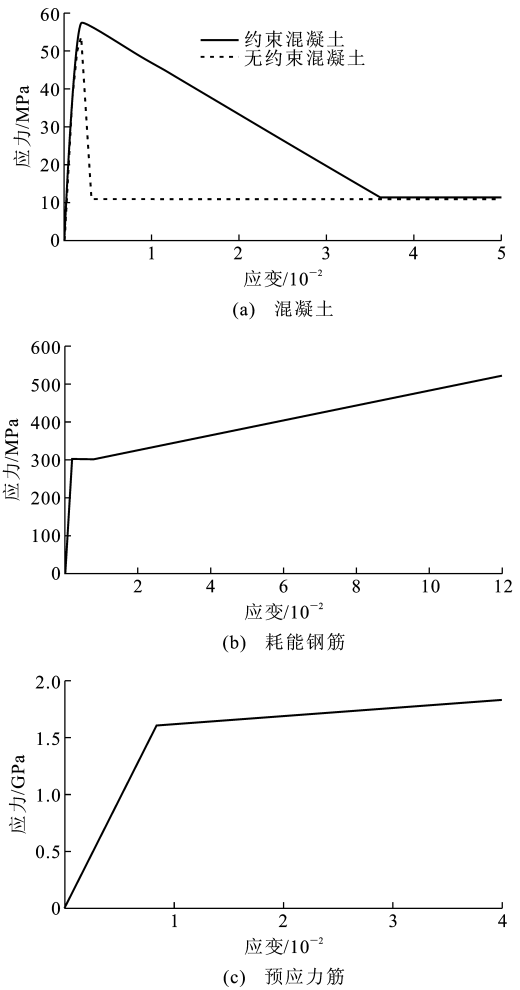


图 1 材料应力-应变关系

Fig. 1 Relations of Material Stress-strain

中给出了典型的预应力筋应力-应变关系。

## 2 弯矩-曲率关系分析

桥墩底部接缝截面混凝土应变沿截面高度的变化与墩底曲率  $\varphi$  有关, 墩底截面上距离中性轴  $x$  处的混凝土应变为

$$\epsilon_c = \epsilon_{c0} + x \varphi \quad (2)$$

式中:  $x$  为计算纤维与截面中性轴的距离。

关键截面处的总曲率  $\varphi_t$  由 2 个部分组成, 即弹性曲率  $\varphi_e$  和塑性曲率  $\varphi_p$ , 由下式表示

$$\varphi_t = \varphi_e + \varphi_p \quad (3)$$

弹性曲率与弯矩呈线性关系, 塑性曲率与弯矩呈非线性关系。

关键截面处的总曲率  $\varphi_t$  可以写成

$$\varphi_t = \frac{\epsilon_c}{c} \quad (4)$$

式中:  $c$  为截面受压区高度。

塑性曲率  $\varphi_p$  与接缝转角  $\theta_c$  有关, 即

$$\varphi_p = \frac{\theta_c}{l_p} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_c &= \theta_p \\ l_p &= 0.08H + 0.022d_b f_y \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中:  $l_p$  为关键截面处塑性铰长度;  $H$  为桥墩高度;  $d_b$  为耗能钢筋直径;  $f_y$  为钢筋屈服强度;  $\theta_p$  为塑性转角。

将式(4)、(5)代入式(3)得到

$$\theta_c = l_p \left( \frac{\varepsilon_c}{c} - \varphi_c \right) \quad (7)$$

假定预应力筋位于截面中心,忽略弹性曲率引起的预应力筋伸长,当受压区高度  $c < h/2$  时,  $h$  为截面高度,预应力筋的伸长  $\Delta_{pt}$  可以表示为

$$\Delta_{pt} = \theta_c \left( \frac{h}{2} - c \right) \quad (8)$$

如果忽略弹性曲率引起的预应力筋伸长,耗能钢筋的伸长  $\Delta_{ms}$  可以写成下式

$$\Delta_{ms} = \theta_c (d - c) \quad (9)$$

$$d = h - a_0 \quad (10)$$

式中:  $d$  为从混凝土受压边缘到受拉耗能钢筋中心的距离;  $a_0$  为受拉耗能钢筋中心到截面混凝土受拉边缘的距离。

在靠近墩底接缝处,能量耗散钢筋一般有一段无粘结长度  $l_{un}$ ,研究表明,能量耗散钢筋的应变不仅与无粘结长度  $l_{un}$  有关,而且与附加无粘结长度  $\Delta_{deb}$  有关。根据 Ozden 等<sup>[8]</sup> 的研究,耗能钢筋附加无粘结长度可以表示为

$$\Delta_{deb} = 2 \times 0.4 \frac{f_s \varepsilon_{si} \sqrt{d_b}}{\sqrt{f_g}} \quad (11)$$

式中:  $f_g$  为灌浆的抗压强度;  $f_s$  为耗能钢筋应力;  $\varepsilon_{si}$  为耗能钢筋应变。

比较计算的耗能钢筋应变  $\varepsilon_{sf}$  与假定的耗能钢筋应变  $\varepsilon_{si}$  是否满足下式

$$\varepsilon_{sf} = \frac{\Delta_{ms}}{l_{un} + \Delta_{deb}} = \varepsilon_{si} \quad (12)$$

考虑后张预应力筋的伸长量  $\Delta_{pt}$ ,其应变可以写成下式的形式

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\Delta_{pt}}{L_{un}} + \varepsilon_{pi} \quad (13)$$

式中:  $L_{un}$  为后张预应力筋的无粘结长度;  $\varepsilon_{pi}$  为后张预应力筋的初始应变。

预应力筋实际应变确定后,可以根据预应力筋的本构模型计算预应力筋应力。

假设墩底接缝截面的变形符合平截面假定,混

凝土应变沿截面高度呈线性变化。矩形实心接缝截面混凝土压力  $C_c$  可以利用下式计算

$$C_c = \int_0^c \sigma_c dA = \int_0^c f_c \varepsilon_c b dx \quad (14)$$

式中:  $f_c$  为混凝土应力-应变函数;  $A$  为截面面积;  $b$  为截面宽度。

受压侧耗能钢筋的受力依赖于截面受压区高度  $c$ ,如果受压区高度  $c$  大于受压侧耗能钢筋与受压混凝土边缘的距离  $d'$ ,则受压侧耗能钢筋缩短;如果受压区高度  $c$  小于受压侧耗能钢筋与受压混凝土边缘的距离  $d'$ ,则受压侧耗能钢筋伸长,缩短或伸长的长度  $\Delta_{cms}$  可以表示为

$$\Delta_{cms} = \theta_c (c - d') \quad (15)$$

受压侧耗能钢筋忽略附加无粘结长度时的应变  $\varepsilon_{sc}$  可以表示成下式

$$\varepsilon_{sc} = \frac{\Delta_{cms}}{l_{un}} \quad (16)$$

受压侧耗能钢筋提供的压力(或拉力)  $C_{ms}$ ,可以根据耗能钢筋的应变计算得到。

截面竖向力平衡方程可以写成

$$T_{pt} + T_{ms} = C_c + C_{ms} \quad (17)$$

式中:  $T_{pt}$  为预应力筋张拉力;  $T_{ms}$  为受拉侧耗能钢筋拉力。

检查墩底截面曲率是否满足式(17),如果不满足,则改变曲率,直到式(17)成立。截面应力-应变和力的平衡如图2、3所示,截面抵抗矩可以利用下式计算

$$M_j = M_{pt} + M_{ms} + M_c + M_{msc} \quad (18)$$

式中:  $M_j$  为截面弯矩总抵抗矩;  $M_{pt}$  为预应力筋提供的抵抗矩;  $M_{ms}$  为受拉侧耗能钢筋提供的抵抗矩;  $M_c$  为混凝土提供的抵抗矩;  $M_{msc}$  为受压侧耗能钢筋提供的抵抗矩。

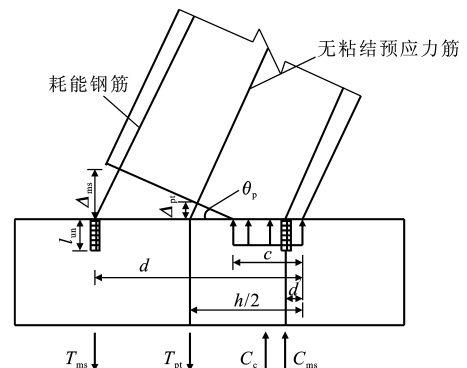


图2 底部节段-基础接缝受力

Fig. 2 Force of Base Segment-foundation Joint

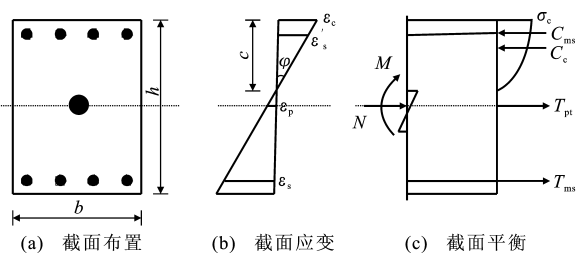


图 3 墩底截面应力-应变和受力平衡

Fig.3 Stress-strain Relation and Force Equilibrium at Column Base Section

3 预制桥墩试件

基于文献[9]所进行的预制桥墩拟静力试验,假定一系列具有不同高宽比、耗能钢筋配筋率的预制桥墩。桥墩具有 3 种高宽比,  $H/l=2.5, 4.6, 7.5$ ,  $l$  为桥墩宽度,如图 4 所示,其中,  $\epsilon'_s$  为耗能钢筋应变。高宽比 4.6 的桥墩为测试试件,另外 2 种桥墩被用于参数分析。桥墩中有 2 种纵向普通钢筋:一种在桥墩预制前设置在桥墩内部用于横向钢筋定位;另一种设置在预留管道内部,预制桥墩安装完毕后灌浆,用于连接接缝,被称为耗能钢筋。无粘结后张预应力筋为 2 根名义直径为 12.7 mm 的钢绞线,截面面积为 99 mm<sup>2</sup>,初始预应力为 1 010 MPa。桥墩截面尺寸为 350 mm×350 mm,水平力方向与预应力布置方向平行,耗能钢筋为 4 根 D16 钢筋,分布在 4 个角点附近,箍筋间距为 50 mm。桥墩参数如表 1 所示,材料特性如表 2 所示。

4 纤维模型

非线性结构分析程序 OpenSees 被用于节段拼装桥墩抗震分析,以便于校核解析分析方法。OpenSees 由美国加利福尼亚大学伯克利分校太平洋地震研究中心开发,是一个面向对象的开源程序。墩柱截面可以分成一定数量的纤维,模拟混凝土和钢筋面积沿单元长度的变化。假定平截面仍保持为平面,并与纵向主轴垂直。纤维梁柱单元忽略了混凝土开裂和钢筋粘结滑移效应,截面抗力通过对纤维应力积分得到。

桥墩钢筋包括通过接缝的有粘结耗能钢筋和无粘结预应力筋以及节段内部的纵向钢筋和横向钢筋。混凝土截面划分成一定数量的混凝土纤维,有粘结耗能钢筋利用钢筋纤维模拟,桥墩内部的横向钢筋和纵向钢筋没有模拟,其效应通过提高混凝土的强度考虑。无粘结后张预应力筋利用杆单元模

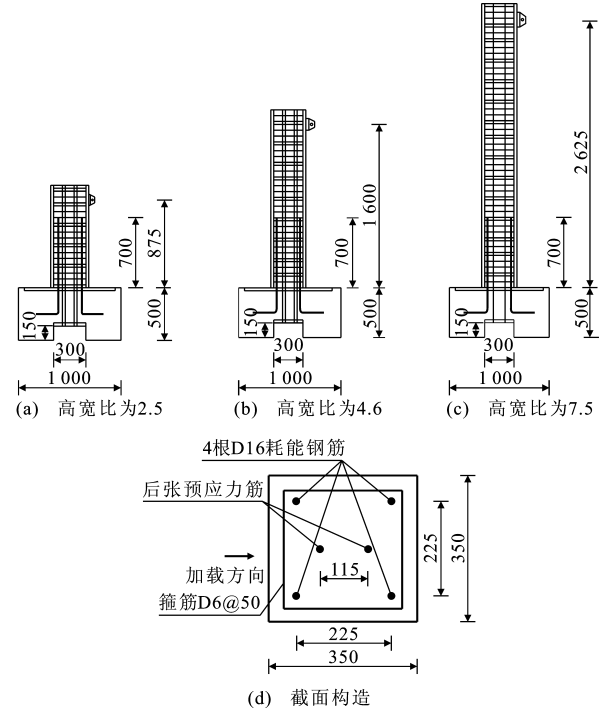


图 4 桥墩试件构造(单位:mm)

Fig.4 Prototype Columns Detailing (Unit:mm)

表 1 桥墩参数			
Tab.1 Pier Parameters			
高宽比	预应力/kN	耗能钢筋配筋率/%	耗能钢筋直径
2.5,4.6,7.5	200	0.00,0.33	无耗能钢筋,16 mm

表 2 材料特性			
Tab.2 Material Properties			
混凝土抗压强度 $f'_c$ /MPa	耗能钢筋屈服 强度 $f_{sy}$ /MPa	预应力筋屈服 强度 $f_{py}$ /MPa	预应力筋极限 强度 $f_{pu}$ /MPa
54.1	304.0	1 600.0	1 870.0

拟,两端分别锚固在墩顶和基础承台中。混凝土应力-应变关系采用 Kent-Scott-Park 模型模拟,耗能钢筋和预应力筋采用 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型模拟,后张预应力筋的初始应力采用初应变模拟。

5 解析分析方法的验证

Palermo 进行了高宽比 4.6 的 2 个预制桥墩拟静力试验,墩高 1 600 mm,桥墩截面尺寸 350 mm×350 mm,墩身采用混凝土,每个试件都配置 2 根直径 12.7 mm 的无粘结钢绞线,恒载轴压比均为 0.03,一个试件没有耗能钢筋,另一个试件加载方向每侧有 2 根直径 16 mm 的耗能钢筋,钢绞线张拉控制应力为 1 010 MPa。拟静力试验加载是位移控制,最终位移为 3.5%或 3%相对位移。试件参数如图 4 和表 1,2 所示。解析模型、OpenSees 纤维模型和试验结果的对比如图 5 所示。试件 A4.6P03ED0

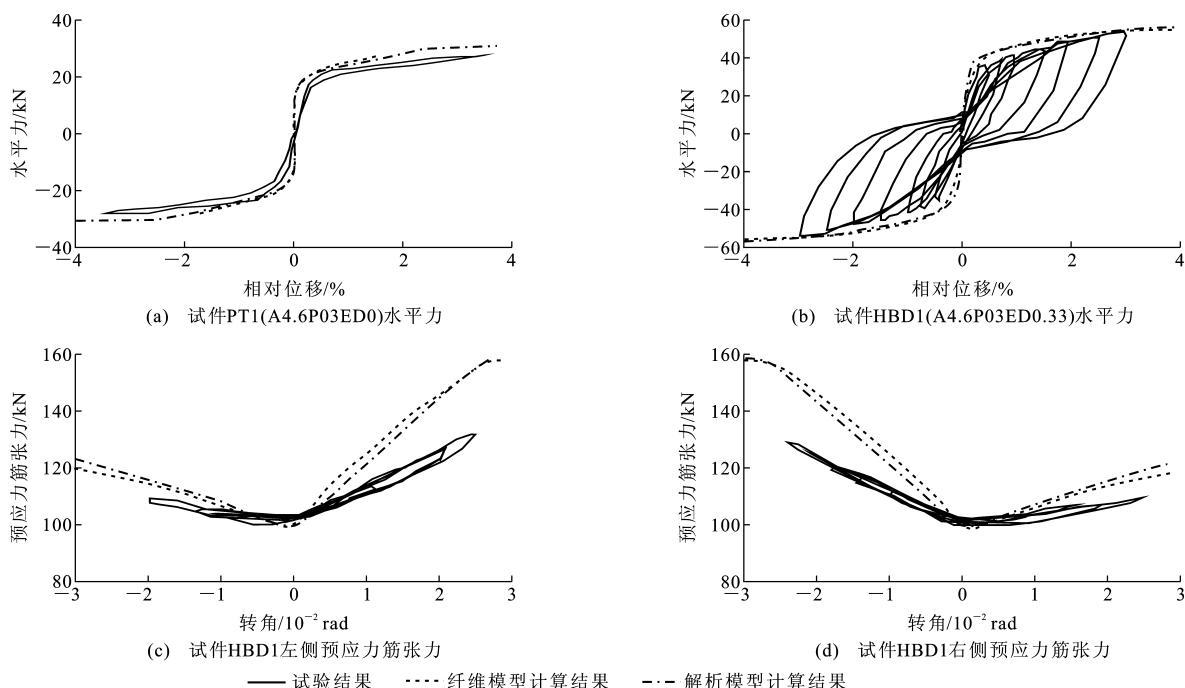


图5 计算结果与试验结果的比较

Fig. 5 Comparisons of Calculation Results and Test Results

的含义是试件的高宽比为 4.6, 预应力轴力为  $0.03f_cA$ , 耗能钢筋配筋率为 0%。结果表明, 解析模型和 OpenSees 纤维模型的计算结果都与测试结果接近。

## 6 解析模型与纤维模型比较

由于试验工况受到限制, 分别利用解析模型和纤维模型计算了一系列假定试件的推导分析, 主要考虑 2 个参数的变化, 分别是高宽比和耗能钢筋配筋率。高宽比分别为 2.5, 4.6, 7.5 这 3 种。轴力由预应力筋提供, 保持恒定, 为  $0.03f_cA$ 。耗能钢筋配筋率考虑 0% 和 0.33% 这 2 种工况, 这样解析模型共计算了 6 个试件。

解析模型和 OpenSees 纤维梁柱单元模型比较如图 6~9 所示, 图 6 中,  $\lambda$  为耗能钢筋配筋率。简化解析模型的水平力-相对位移曲线与 OpenSees 纤维梁柱单元模型基本一致(图 6), 但稍有差别, 主要有以下 3 个方面原因: ①材料模型的差异; ②OpenSees 纤维模型未考虑耗能钢筋无粘结长度; ③简化解析模型未考虑荷载-位移( $P-\Delta$ )效应。

随着桥墩高宽比增大, 解析模型耗能钢筋应变计算结果分别小于、等于和大于 OpenSees 纤维模型的结果(图 7), 原因是 OpenSees 纤维模型耗能钢筋的附加无粘结长度计算与解析模型不一致, 解析模型中考虑了 250 mm 的无粘结长度, 对于高宽比

2.5 的桥墩偏大, 对于高宽比 7.5 的桥墩偏小。解析模型关键截面的混凝土压应变与 OpenSees 纤维模型基本一致(图 8), 但在桥墩破坏处附近有较大差别, 因为 OpenSees 纤维模型中混凝土材料模型在破坏时有一个负刚度段, 模拟了承载力下降段。2 种计算模型的预应力筋应力基本一致(图 9), 尽管两者随着位移的增大出现一定的差别, 但计算精度仍可以接受。

## 7 结语

基于截面弯矩-曲率分析提出了一种预制桥墩抗震计算的解析分析方法, 解析模型和纤维模型计算结果与拟静力试验结果基本一致, 解析模型可以代替纤维模型进行预制桥墩的抗震性能计算。

### 参考文献:

#### References:

- [1] BILLINGTON S L, BARNES R W, BREEN J E. A Precast Segmental Substructure System for Standard Bridges[J]. PCI Journal, 1999, 44(4): 56-73.
- [2] WANG J C, OU Y C, CHANG K C, et al. Large-scale Seismic Tests of Tall Concrete Bridge Columns with Precast Segmental Construction[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(12): 1449-1465.
- [3] HEWES J T, PRIESTLEY M J N. Seismic Design and

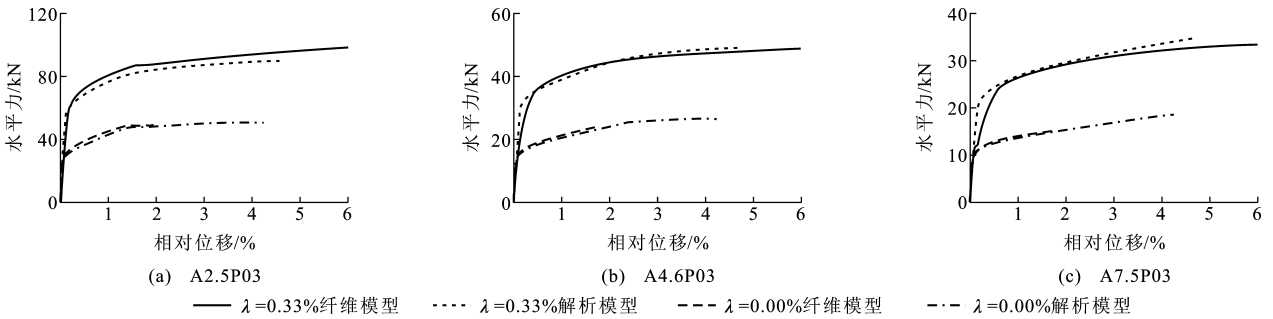


图 6 水平力-相对位移曲线  
Fig. 6 Lateral Force-relative Displacement Curves

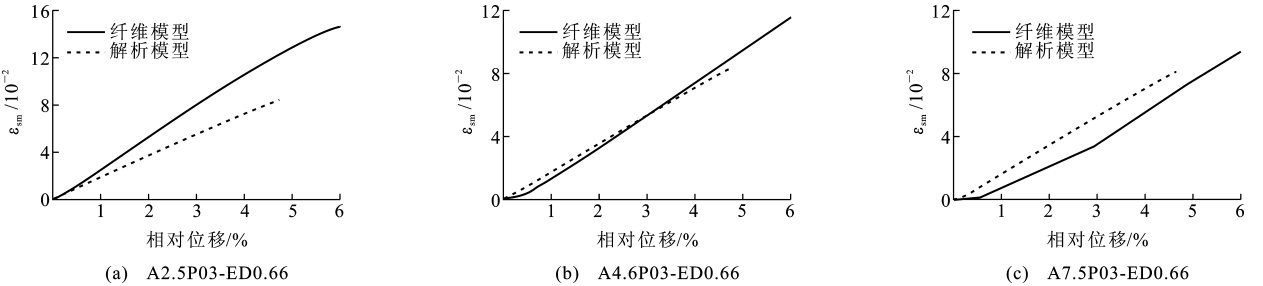


图 7 耗能钢筋应变  
Fig. 7 Energy Dissipation Bar Strains

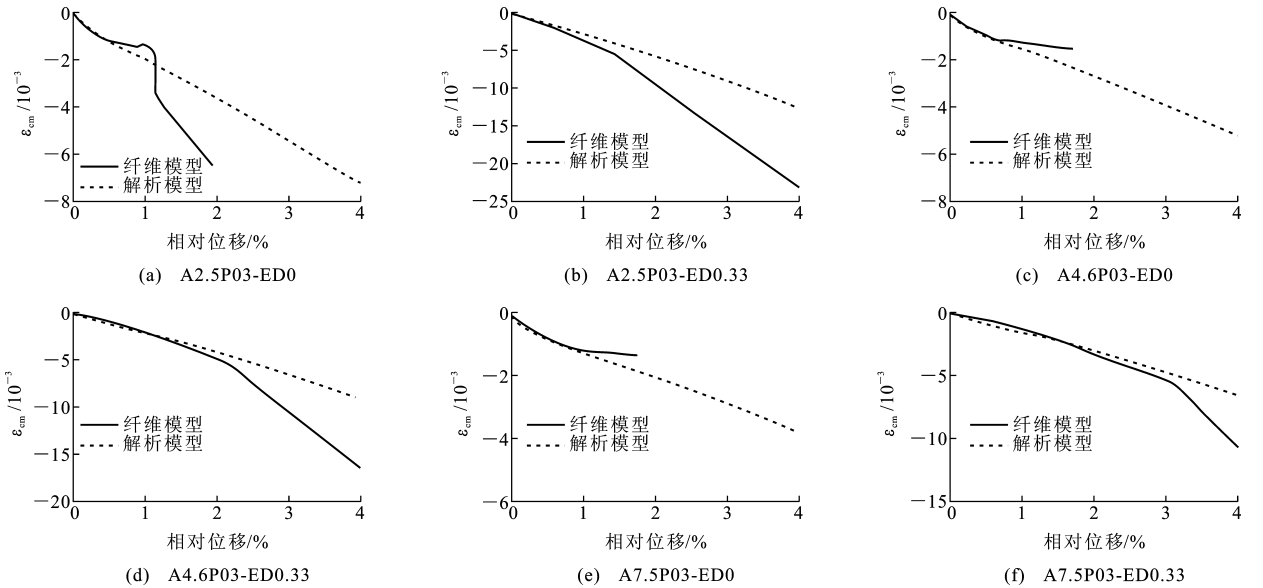


图 8 混凝土压应变  
Fig. 8 Concrete Compressive Strains

Performance of Precast Concrete Segmental Bridge Columns[R]. San Diego:University of California,2002.

[4] SHIM C S,CHUNG C H,KIM H H. Experimental Evaluation of Seismic Performance of Precast Segmental Bridge Piers with a Circular Solid Section[J]. Engineering Structures,2008,30(12):3782-3792.

[5] 王志强,葛继平,魏红一. 东海大桥预应力混凝土桥墩抗震性能分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008,36(11):1462-1466,1500.

WANG Zhi-qiang,GE Ji-ping,WEI Hong-yi. Seismic Performance of Prestressed Concrete Bridge Column of East Sea Bridge[J]. Journal of Tongji University:Natural Science,2008,36(11):1462-1466,1500.

[6] PARK R,KENT D C,SAMPTON R A. Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading[J]. Journal of the Structural Division,1972,98(7):1341-1360.

[7] SCOTT B D,PARK R,PRIESTLEY M J N. Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping

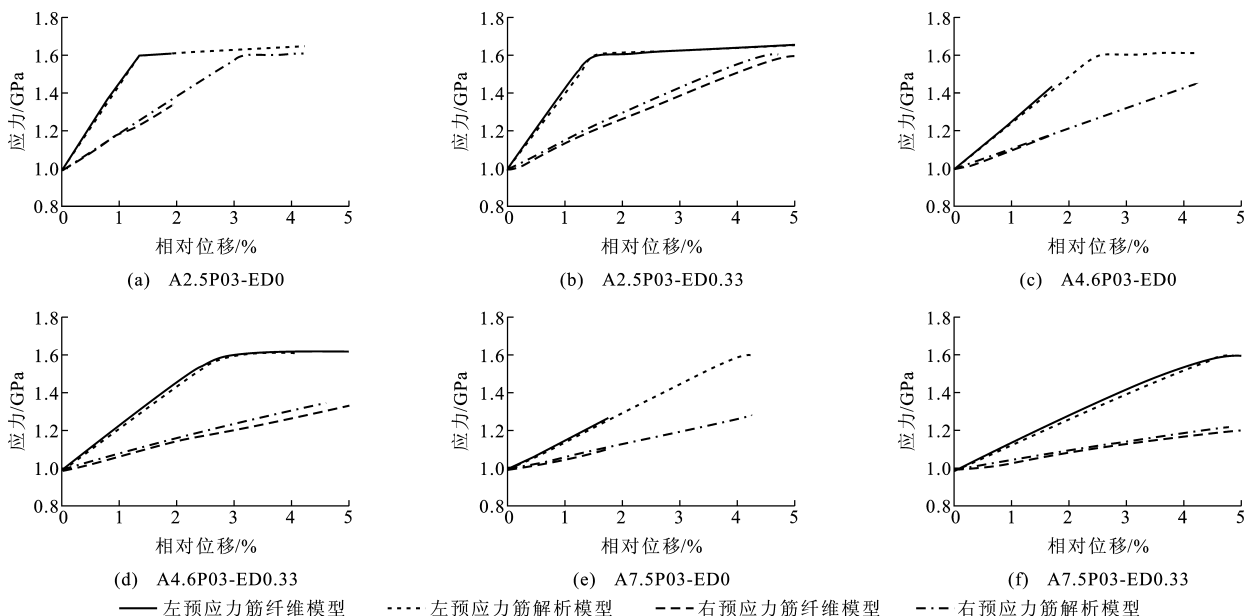


图 9 预应力筋应力

Fig. 9 Prestressing Tendon Stresses

Hoops at Low and High Strain Rates[J]. ACI Journal, 1982,79(1):13-27.

[8] OZDEN S,ERTAS O. Modeling of Pre-cast Concrete Hybrid Connections by Considering the Residual Deformations[J]. International Journal of the Physical Sciences,2010,5(6):781-792.

[9] PALERMO A, PAMPANIN S, MARRIOTT D. Design, Modeling, and Experimental Response of Seismic Resistant Bridge Piers with Posttensioned Dissipating Connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2007,133(11):1648-1661.

## 《土木工程学报》2013 年征订通知

《土木工程学报》是中华人民共和国住房和城乡建设部主管,中国土木工程学会主办的土木工程类综合性学术期刊,以土木工程界中高级工程技术人员为主要读者对象;主要报道结构工程、桥梁工程、岩土力学及地基基础、隧道工程、防护工程、道路及交通工程、建设管理等专业在科研、设计、施工等方面的重要成果及发展状况,重视刊登结合工程实践的论著,并报道行业综述、科技信息和动态,促进国内外土木工程界的学术交流。

《土木工程学报》创刊于 1954 年 3 月,现为美国《工程索引》(Ei)收录期刊、北京大学工业技术类全国中文核心期刊、中国科技信息研究所中国科技核心期刊、中科院文献情报中心中国科学引文数据库核心期刊和武汉大学中国科学评价研究中心权威学术期刊。

《土木工程学报》为月刊,大 16 开本,每期定价 25 元,全年共 300 元;国内外公开发行,国内邮发代号:2-582,国外发行代号:M288。《土木工程学报》2013 年征订工作已经开始,欢迎各界有关单位及个人订阅。

地 址:北京市三里河路 9 号住建部内 电 话:(010)58934211 网 址:www.cces.net.cn  
邮 编:100835 传 真:(010)58933912 E-mail:tumuxuebao@263.net