

[文章编号] 1002-8412(2006)06-0025-05

往复荷载下预应力混凝土结构的数值模拟

汪训流,叶列平,陆新征(清华大学土木工程系,北京 100084)

[摘要] 现阶段,预应力技术得到广泛应用,深入研究预应力混凝土结构或构件的抗震性能有着重要的工程意义。在往复荷载下,预应力混凝土结构或构件的材料和力学行为复杂,需要借助数值模型加以准确模拟。本文基于杆件结构纤维模型程序,编制了预应力混凝土杆系结构及构件的数值分析模型。利用该模型,本文对往复荷载下的一榀有粘结预应力混凝土框架试件和一榀无粘结预应力混凝土框架试件,以及一根无粘结预应力混凝土柱试件进行了数值模拟。计算结果与试验结果的对比表明,由于采用了合理而准确的材料滞回模型并合理考虑了预应力的影响,本文开发的杆系有限元数值分析模型能够准确预测往复荷载下预应力混凝土杆系结构或构件的滞回特性,可以用于预应力混凝土实际结构的计算分析及其受力机理的探讨。

[关键词] 纤维模型;往复荷载;预应力混凝土;分析方法

[中图分类号] TU378.1 [文献标识码] A

Numerical Simulation for the Hysteresis Behavior of Prestressed Concrete Structures under Cyclic Loads

Wang Xun-liu, Ye Lie-ping, Lu Xin-zheng (Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Due to progressively using in practical construction of prestressed concrete structures, the researches for seismic performance of prestressed concrete (PC) structures has remarkable significance in engineering practice. Because of the complicated behavior of material and loads, the precise simulation of PC structures or members under cyclic loads has to depend on numerical model. In this paper, a numerical analysis model for the simulation of PC member structures is developed on the basis of a fiber model program. A PC frame, an unbonded PC frame and an unbonded PC column under cyclic loads are simulated with the developed program. The comparison of the results between simulations and tests indicates that, for the reason of using rational hysteretic material model and exactly considering the influence of prestressing, the numerical analysis model based on fiber models developed in this study can accurately predict the hysteretic properties of PC structures and can be used in the parametric analysis and mechanism study.

Keywords: fiber model; cyclic load; prestressed concrete; analysis method

1 引言

目前,预应力混凝土结构已在各种工程结构中得到广泛应用,深入研究预应力混凝土结构或构件的抗震性能有着重要的工程意义。而往复荷载下结构或构件的受力及变形特性是其抗震性能的一个重要内容,但往复荷载下预应力混凝土结构或构件的材料和力学行为复杂,需要借助数值模型加以准确模拟。

本文基于纤维模型,编制了预应力混凝土杆系结构及构件的数值分析模型,并将其嵌入商用 MARC 结构分析软件^[1]中,对往复荷载下的一榀有粘结预应力混凝土框架试件、一榀无粘结预应力混凝土框架试件和一根无粘结预应力混凝土柱试件进行了数值模拟。计算结果与试验结果的对比表明,由于采用了合理而准确的材料滞回模型,并合理考虑了预应力、特别是合理考虑了无粘结预应力钢筋与混凝土间的相对滑移,所采用数值分析模型能够准确预测往复荷载下预应力混凝土杆系结构或构件的受力性能。

2 数值分析模型

[收稿日期] 2005-05-22

[基金项目] 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题
(20040003095)

2.1 材料本构

纤维模型的杆件单元,其截面被划分为若干个纤维,每个纤维均为单轴受力,并用单轴应力应变关系来描述该纤维材料的特性,纤维间的变形协调则采用平截面假定。

2.1.1 混凝土本构模型

混凝土受压单调加载包络线选取 Legeron & Paultre 模型^[2],该模型可考虑钢筋混凝土中纵、横向配筋对混凝土约束效应的影响,根据有无配筋确定是否为约束混凝土及其参数;受拉单调加载包络线采用江见鲸模型^[3],考虑了“受拉刚化效应”;加卸载本构考虑了混凝土的刚度退化及滞回行为,并对往复加载下混凝土拉压过渡区进行模拟,较好地反映了混凝土的复杂受力变形特性。混凝土本构模型如图 1 所示,需要输入混凝土的峰值应力 σ_{c0} (对应素混凝土)、峰值应变 ϵ_{c0} (对应素混凝土)、极限压应变 ϵ_{cu} 、抗拉强度 f_t 、极限拉应变 ϵ_{tu} 以及弹模参数 E_c 、 E_t 、 E_{min} 和相关配筋指标 (图中 I_{e0} 为混凝土的有效约束指标)。

2.1.2 钢筋本构模型

钢筋本构为通用型本构,可以描述拉压等强具有屈服台阶的普通钢筋和拉压不等强没有屈服台阶的高强钢筋或钢绞线,并合理考虑 Bauschinger 效应,如图 2 所示。其中,单调加载包络线采用 Esmaily & Xiao 模型^[4],卸载曲线为直线,再加载曲线选用 Legeron 等模型^[5],本构中引入钢筋的拉压屈服强度之比以模拟高强钢筋或钢绞线。输入参数为:钢筋硬化起点应变、峰值应变、极限应变与屈服应变的比值 k_1 、 k_2 、 k_3 、峰值应力与屈服强度比值 k_4 、拉压屈服强度之比 k_5 以及钢筋抗拉屈服强度 f_y 、钢筋弹性模量 E_s 。

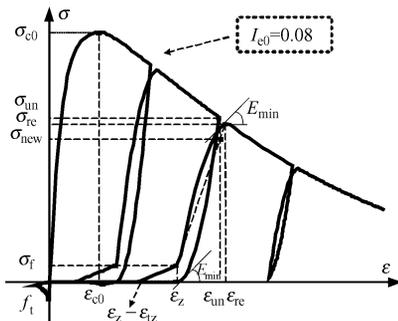


图 1 混凝土应力 - 应变曲线

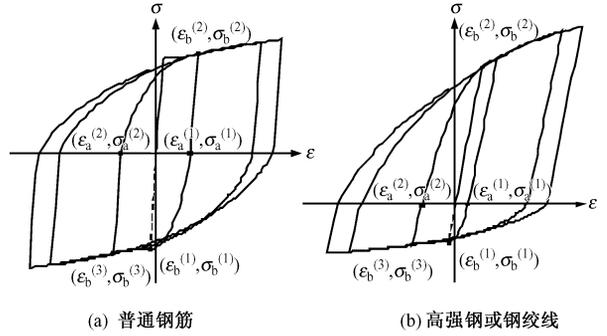


图 2 钢筋应力 - 应变曲线

2.2 有限元建模

结构构件采用空间梁单元建模,单元截面特性由纤维模型确定。与普通钢筋混凝土 (RC) 构件不同,预应力混凝土 (PC) 构件中的预应力筋往往是曲线布置,而对于无粘结预应力混凝土 (UPC) 构件,无粘结筋与混凝土之间的界面滑移不可忽略,故建模时将构件划分成钢筋混凝土 (RC) 和预应力筋 (PPS) 两部分,两部分间的连接通过自由度耦合实现。具体建模包括: 截面材料分类并独立建模, 模型间的自由度耦合。

2.2.1 材料分类及建模

纤维模型是将杆件截面划分成若干纤维,每个纤维均为单轴受力,并用其单轴应力应变关系来描述纤维的材料特性,纤维间的变形协调则采用平截面假定。对于预应力混凝土构件,普通钢筋可认为与混凝土间粘结良好,满足平截面假定;而预应力筋,按粘结形式分为有粘结和无粘结两种形式,对于有粘结预应力筋,也可认为与混凝土间粘结良好,满足平截面假定,但对于无粘结预应力筋,其与混凝土间不满足应变协调关系,即不满足平截面假定。考虑到数值分析模型的通用性 (同时适用于有粘结和无粘结预应力混凝土),将截面材料分成钢筋混凝土、预应力筋两种类型进行独立建模。建模时,两部分均采用梁单元模拟,其中预应力筋预应力的施加采用初始应力法。

2.2.2 自由度耦合

考虑在距截面中心某一侧配置面积为 A_p 、偏心距为 e_p 的直线预应力筋的预应力钢筋混凝土构件 (图 3a),如为多根预应力筋,则可按照各预应力筋及其偏心距逐个 (或分组) 进行相似处理。分别按钢筋混凝土部分 (图 3b) 和预应力筋部分 (图 3c) 独立建模完成后,将两者之间采用自由度耦合方式进行

连接,形成整体,如图 3d 所示。

自由度耦合分完全耦合和部分耦合两种方式。其中,完全耦合针对构件端部预应力筋的锚固情形,预应力筋结点与钢筋混凝土部分的相应结点的连接使用刚臂连接键(Rigid Arm Link,即 L-RA),刚臂长度与预应力筋的偏心距相关,刚臂与两部分间相应结点的 6 个自由度(沿三个坐标轴方向的平动自由度和绕三个坐标轴方向的转动自由度)均进行耦合;部分耦合针对预应力筋与钢筋混凝土部分两端之间内部相应结点的连接,并称这种连接方式为耦合连接键(Coupling Link,即 L-CP)。耦合连接键 L-CP 结点沿预应力筋纵向的平动自由度,当模拟无粘结形式时予以释放以模拟预应力筋与混凝土之间的自由相对滑动情况,当模拟有粘结形式时则根据平截面假定建立约束方程以实现预应力筋与混凝土的粘结;其他 5 个自由度(2 个平动自由度、3 个转动自由度)与混凝土部分进行耦合以保证相应自由度同值。

对于曲线预应力筋情形,可采用足够数量的梁单元先将预应力筋分段折线化后,再按照图 3 同样原理进行建模。

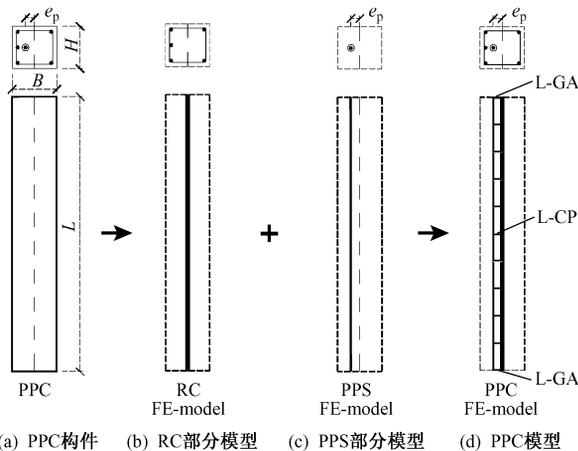


图 3 预应力混凝土构件的有限元建模

3 数值模拟

将建立的数值分析模型嵌入 MARC 商用有限元分析软件^[11],分别对文献[6]的两榀预应力混凝土框架试件(有粘结框架 B-1、无粘结框架 UB-2)和文献[1]的一根无粘结预应力混凝土压弯柱试件(S-2)进行了数值模拟分析。分析过程中采用严格的力和位移收敛准则(0.5%)。钢筋混凝土部分每个截面划分成 6 × 30 根混凝土纤维(沿水平荷载方向为 30 根纤维)和同普通纵筋数目相同的普通钢筋纤维。构

件的预应力筋部分按照不同预应力筋的位置归类后按等效预应力筋面积在其中心用 1 根纤维模拟,纤维面积为等效预应力筋的面积。

3.1 有粘结预应力混凝土框架结构的数值模拟

文献[6]进行的有粘结预应力混凝土框架试件 B-1 受力图和截面如图 4 所示,试件材性参数见表 1,各构件尺寸、配筋参数及轴压力、预应力筋预加应力见表 2。采用本文上述模型和方法对试件 B-1 在预应力筋发生严重粘结退化前^[6]的受力过程进行模拟,计算结果与试验结果的对比见图 5。由图可见,数值分析结果很好地预测了往复荷载下有粘结预应力混凝土框架在预应力筋发生严重粘结退化前的滞回特性。其中,在正方向加载时(第一象限),最终残余位移和最大承载力的预测误差分别为 $| (18.9 - 18.4) / 18.4 | = 2.7\%$ 和 $| (97.9 - 97.2) / 97.2 | = 0.7\%$;在负方向加载时(第三象限),最终残余位移和最大承载力的预测误差分别为 $| (16.0 - 14.6) / 14.6 | = 9.6\%$ 和 $| (100.8 - 98.5) / 98.5 | = 2.3\%$ 。根据文献[6]的试验研究,当框架试件 B-1 受力变形较大时,预应力筋与混凝土的界面粘结受到一定程度的破坏,其粘结性能从有粘结逐渐过渡到无粘结。由于对这种预应力筋粘结逐渐退化过程的界面模型研究还很不充分,本文没有对该试验大变形阶段的滞回性能进行模拟分析。从图 5 的对比可见,由于本文采用的是有粘结预应力筋分析模型,在最大承载力后,随着试件变形的增大,因预应力筋粘结的逐渐退化,计算承载力衰减程度小于试验结果,表明预应力筋的粘结性能对试件的承载力有一定影响。

表 1 框架试件 B-1、UB-2 材性参数

混凝土参数		普通钢筋参数	预应力筋参数	
B-1	UB-2		Φ2	Φ8
$\sigma_0 = 35$	$\sigma_0 = 37$	$k_1 = 4, k_2 = 25$	$k_1 = 1, k_2 = 40$	$k_1 = 1, k_2 = 40$
$\sigma_0 = 0.002$	$\sigma_0 = 0.002$	$k_3 = 40$	$k_3 = 40$	$k_3 = 40$
$c_u = 0.01$	$c_u = 0.01$	$k_4 = 1.5$	$k_4 = 1.2$	$k_4 = 1.3$
$f_t = 3.5$	$f_t = 3.7$	$k_5 = 1$	$k_5 = 2.3$	$k_5 = 1.9$
$t_u = 0.001$	$t_u = 0.001$	$f_y = 245$	$f_y = 883$	$f_y = 736$
$E_c = E_t = 33300$	$E_c = E_t = 33800$	$E_s = 206000$	$E_s = 200000$	$E_s = 200000$
$E_{min} = 0$	$E_{min} = 0$	$f_{yh} = 245$		
$a_s = a_p = 25$	$a_s = a_p = 25$	$f_{uh} = 363$		
$a_p = a_p = 40$	$a_p = a_p = 40$			

注:表 1 中,长度单位为 mm、强度单位为 MPa、下标中带 h 的为箍筋参数。

表 2 框架试件 B-1、UB-2 各构件尺寸、配筋及竖向力和预应力筋预加应力

构件编号	尺寸 (mm)	纵筋/配筋率		箍筋 /体积配箍率	预应力筋有效预加应力 (MPa)				竖向力 P_1 (kN)
		普通筋	预应力筋		左(上)侧		右(下)侧		
					B-1	UB-2	B-1	UB-2	
C-1	150 ×220 ×1580	4 ϕ 6/0.39 %	4 ϕ 12/1.33 %	ϕ 6 @80/ 0.90 %	459	438	454	440	14.1
C-2	150 ×220 ×1580	4 ϕ 6/0.39 %	4 ϕ 12/1.33 %	ϕ 6 @80/0.90 %	441	452	450	450	
B	150 ×220 ×2600	4 ϕ 6/0.39 %	2 ϕ 18/1.51 %	ϕ 6 @80/ 0.90 %	452	450	441	443	

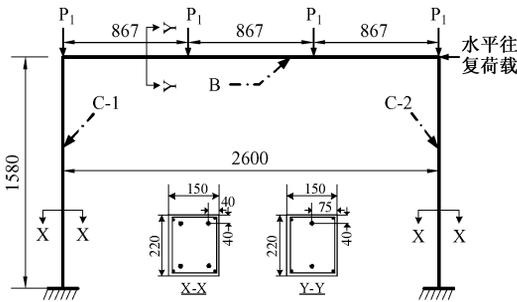


图 4 试件 B-1 受力及截面示意图(单位 :mm)

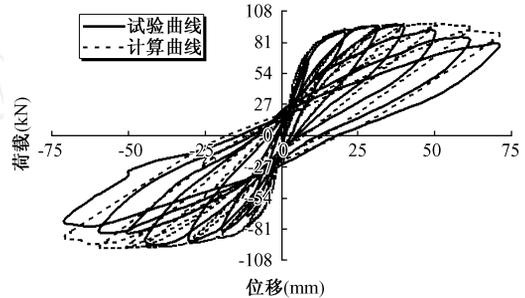


图 5 试件 B-1 计算结果与试验结果的对比

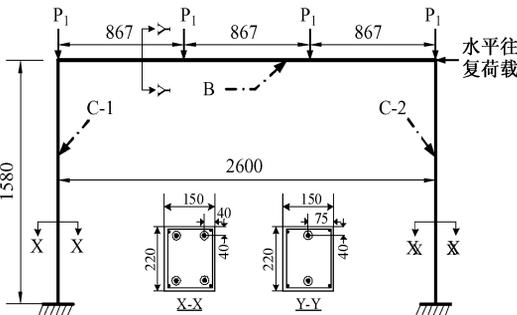


图 6 试件 UB-2 受力及截面示意图(单位 :mm)

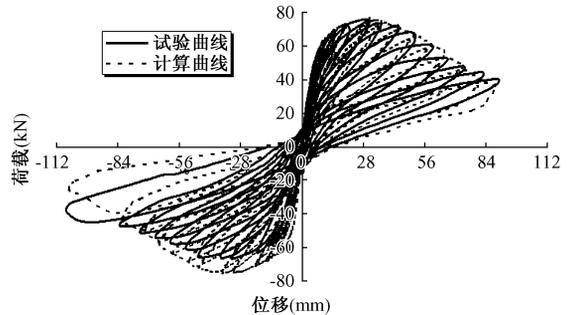


图 7 试件 UB-2 计算结果与试验结果的对比

3.2 无粘结预应力混凝土框架结构的数值模拟

文献[6]进行的无粘结预应力混凝土框架试件 UB-2 受力简图如图 6 所示。试件材性参数见表 1, 各构件尺寸、配筋参数及轴压力、无粘结筋预加应力大小见表 2, 计算结果与试验结果的对比见图 7。由图可见, 数值分析结果很好地预测了往复荷载下无粘结预应力混凝土框架的滞回特性。其中, 在受正方向水平荷载时(第一象限), 除最后两荷载循环外, 计算曲线与试验曲线几乎重合, 最终残余位移和最大承载力的预测误差分别为 $| (14.1 - 13.6) / 13.6 | = 3.7\%$ 和 $| (76.3 - 74.9) / 74.9 | = 1.9\%$; 在受负方向水平荷载时(第三象限), 模型的预测精度略低, 最终残余位移和最大承载力的预测误差分别为 $| (17.5 -$

$16.8) / 16.8 | = 4.2\%$ 和 $| (73.4 - 67.2) / 67.2 | = 9.2\%$, 均小于 10%。

与 B-1 试件相比, 当两者在同样变形加载情况下, UB-2 的残余变形小于 B-1, 如位移加载等于 73mm 时, UB-2 的残余变形为 8mm, B-1 的残余变形为 20mm。由此可知, 无粘结预应力混凝土框架结构在经历往复荷载作用后, 比有粘结预应力混凝土框架结构有较好的复位性能。

3.3 无粘结预应力压弯柱的数值模拟

压弯柱试件 S-2 受力及截面示意图如图 8 所示, 尺寸及材性参数见表 3, 配筋参数、水平荷载作用点位置及轴压力、无粘结筋有效预加应力大小见表 4, 计算结果与试验结果的对比见图 9。由图可

见,数值分析结果很好地预测了往复荷载下无粘结预应力混凝土柱的滞回特性。其中,在正向加载时(第一象限),除第一个荷载循环外,计算曲线与试验曲线几乎重合,最终残余位移和最大承载力的预测误差分别为 $| (8.0 - 7.7) / 7.7 | = 3.9\%$ 和 $| (186.4 - 185.2) / 185.2 | = 0.6\%$;在负向加载时(第三象限),最终残余位移和最大承载力的预测误差分别为 $| (10.8 - 10.4) / 10.4 | = 3.8\%$ 和 $| (182 - 170) / 170 | = 7.1\%$ 。从试验和数值模拟结果可知,无粘结预应力混凝土柱在经历往复荷载作用后,有较好的复位性能,这对于震后结构的修复十分有利。

表 3 压弯柱试件 S-2 尺寸及材性参数

尺寸	材性参数		
	混凝土参数	普通钢筋参数	无粘钢筋参数
400 x400 x1650	$\alpha_0 = 35, \alpha_0^0 = 0.002$	$k_1 = 4, k_2 = 25$	$k_1 = 4, k_2 = 40$
	$c_u = 0.01$	$k_3 = 40, k_4 = 1.4$	$k_3 = 40, k_4 = 1.4$
	$f_t = 3.5, t_u = 0.001$	$k_5 = 1$	$k_5 = 3.6$
	$E_c = E_t = 34400$	$f_y = 401$	$f_y = 1421$
	$E_{min} = 0$	$E_s = 206000$	$E_s = 191000$
	$a_s = a_s = 35$	$f_{yh} = 387$	
	$a_p = a_p = 70$	$f_{uh} = 566$	

注:表 3 中,长度单位为 mm、强度单位为 MPa、下标中带 h 的为箍筋参数。

表 4 压弯柱试件 S-2 配筋、水平荷载作用点位置及轴压力、无粘钢筋预加应力大小

纵筋/配筋率		箍筋/体积配筋率	水平荷载作用位置 (mm)	轴压力 N(kN)/轴压比	有效预加应力 (MPa)		
普通筋	无粘钢筋				左侧	中间	右侧
16 ϕ 10 /0.79%	8 ϕ 12.7 /0.63%	ϕ 6 @30 /0.47%	距离柱底 1500	160/0.03	635	635	635

4 结语

本文基于纤维模型建议了预应力混凝土杆系结构的数值分析模型和方法,可较好地对比往复荷载下有、无粘预应力混凝土框架结构和柱的受力性能进行数值模拟,对最大承载力和最终残余变形的预测误差均小于 10%,而且数值计算中均采用严格的

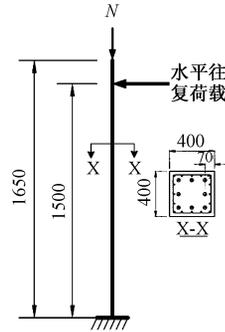


图 8 试件 S-2 受力示意图(单位: mm)

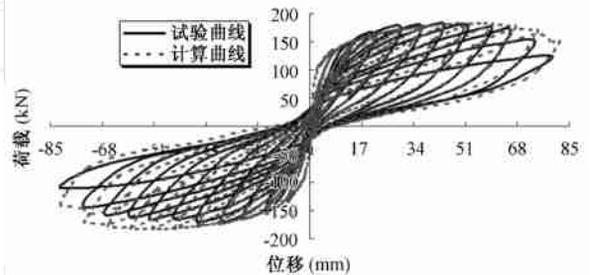


图 9 试件 S-2 计算结果与试验结果的对比

力和位移收敛准则(0.5%),说明本文方法和程序具有很好的收敛性。本文建议模型和方法可以用于预应力混凝土结构抗震性能的计算分析。

参考文献:

- [1] MSC. Marc 2005 在线帮助文档
- [2] Leron F and Paultre P. Uniaxial confinement model for normal and high strength concrete columns [J]. J. Struct. Eng., ASCE, 2003, 129(2), 241 ~ 252
- [3] 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
- [4] Esmaily A and Xiao Y. Behavior of Reinforced Concrete Columns under Variable Axial Loads: Analysis [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5), 736 ~ 744
- [5] Leron F, Paultre P and Mazar J. Damage Mechanics Modeling of Nonlinear Seismic Behavior of Concrete Structures [J]. J. Struct. Eng., ASCE, 2005, 131(6), 946 ~ 954
- [6] 苏小卒. 预应力混凝土框架抗震性能研究[M]. 上海:上海科学技术出版社,1998
- [7] Zatar W and Mutsuyoshi H. Residual Displacements of Concrete Bridge Piers Subjected to Near Field Earthquakes [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(6), 740 ~ 749

[作者简介] 汪训流(1977~),男,湖北省阳新县人,博士研究生,从事预应力混凝土结构抗震性能研究