

预应力筋粘结形式对结构抗震性能的影响分析

汪训流 陆新征 叶列平

(清华大学土木工程系 北京 100084)

摘要: 对于预应力混凝土抗震结构, 不同预应力筋粘结形式会对结构抗震性能产生重要影响。本文利用所开发的杆系有限元纤维模型程序, 完成了一榀预应力混凝土框架结构的数值模拟, 对预应力筋粘结形式的影响进行了分析研究。数值结果表明, 对于按现有规范设计的预应力混凝土框架, 框架柱中的预应力筋粘结形式对框架的滞回特性特别是复位性能有较大影响, 而框架梁中的预应力筋粘结形式的影响则相对较小。根据数值分析结果, 从结构综合抗震性能角度出发, 宜采用部分无粘结预应力筋形式。

关键词: 预应力混凝土; 抗震性能; 粘结形式; 复位性能; 纤维模型

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。对于预应力混凝土结构或构件, 预应力筋的粘结形式对其抗震性能有较大影响。考察并探讨往复荷载下预应力筋粘结形式对结构或构件滞回性能的影响, 并分析其内在机理, 对于深入研究预应力混凝土结构或构件的抗震性能有重要意义。本文利用所开发的数值分析模型^{错误! 未找到引用源。}, 对文献[2]中的一榀预应力混凝土框架结构试验进行了数值模拟, 并讨论了不同预应力筋粘结形式对抗震性能的影响。

1 数值分析模型简介

本研究所开发的数值分析模型^{错误! 未找到引用源。}, 是依托非线性有限元分析软件 MSC MARC^[3]进行二次开发的基于纤维模型的杆系结构有限元分析程序。计算时, 采用空间梁单元对结构或构件进行离散, 单元截面特性由纤维模型确定, 每个纤维均为单轴受力, 并用其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。材料本构见图 1。混凝土受压和受拉单调加载包络线分别选取 Légeron&Paultre 模型^[4]和江见鲸模型^[5], 受压加卸载曲线采用抛物线并用直线模拟拉压过渡区, 受拉加卸载曲线为“指向正负应力转折点型”; 钢筋单调加载包络线采用 Esmaeily&Xiao 模型^[6], 卸载曲线为直线, 再加载曲线选用 Légeron 等模型^[7], 本构模型中引入了钢筋拉压屈服强度之比^{错误! 未找到引用源。}以模拟高强钢筋或钢绞线。

高等学校博士学科点专项科研基金资助课题, 编号 20040003095

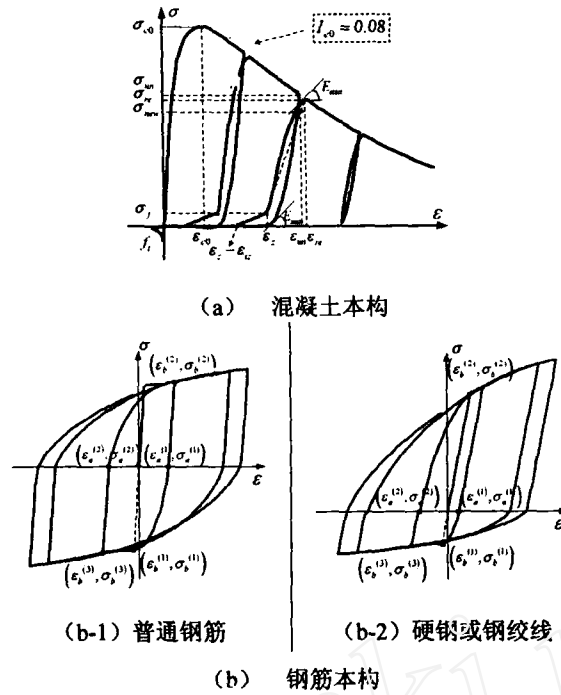


图1 材料本构

预应力混凝土 (PC) 构件的有限元建模见图 2: 预应力混凝土构件被分解成钢筋混凝土 (RC) 和预应力筋 (PS) 两部分进行分别独立建模后, 再采用连接单元将两者合并成 PC 构件, 连接单元分为刚臂连接键 (L-RA) 和耦合连接键 (L-CP) 两种^{错误! 未找到引用源。}, 分别模拟预应力筋与混凝土间的端部锚固及粘结。对于多根直线预应力筋情形, 可按照各预应力筋的面积及其偏心距逐个 (或分组) 按图 2 方法逐个建模; 对于曲线预应力筋情形, 则可采用足够数量的梁单元先将预应力筋分段折线化, 之后按图 2 进行建模。

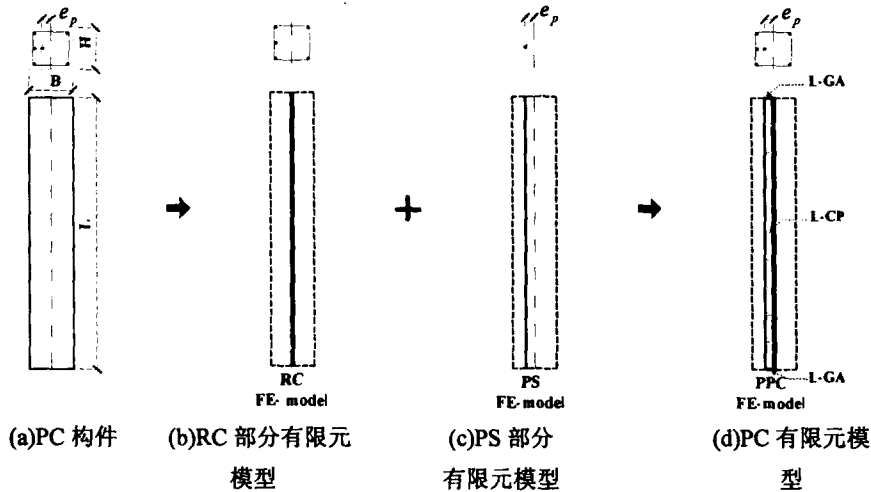


图2 预应力混凝土构件的有限元建模

2 数值计算

利用上述数值分析模型和程序^{错误！未找到引用源。}，本文对文献[2]的一榀无粘结预应力混凝土框架结构试验(UB-2)进行了反复荷载下的数值模拟，并讨论了不同预应力筋粘结形式的影响。

2.1 原型结构

文献[2]无粘结预应力混凝土框架结构试验(UB-2)为一单层单跨无粘结预应力混凝土框架，如图3所示。屋面恒载为 4.61kN/m^2 ，屋面活载为 1.47kN/m^2 。对原型分别算出恒载、活载、风载和地震力组合的质量 m 所产生的垂直荷载及水平地震力(按Ⅲ类场地土、烈度7度计算)作用下的内力图，供模型设计之用，其中 m 考虑了恒载及 0.294kN/m^2 的活载，并考虑了柱自重的一半。模型和原型的设计均符合规范TJ 10-74^[3]和TJ 11-78^{错误！未找到引用源。}的要求。

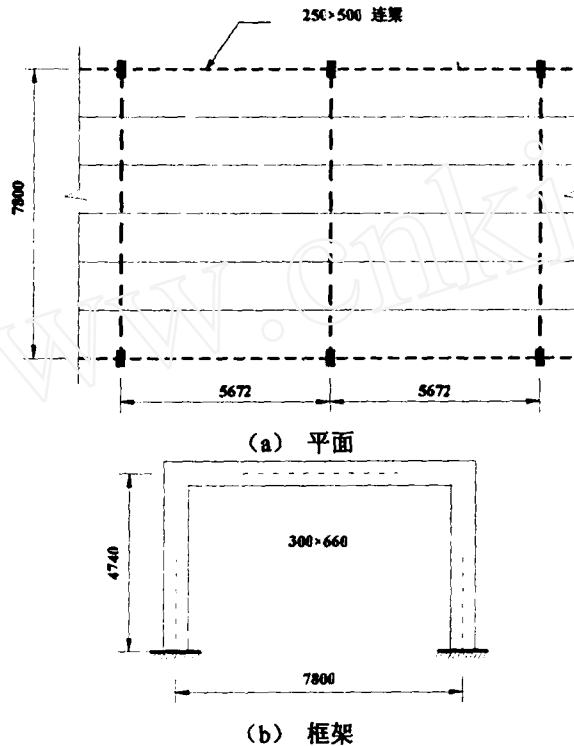


图3 原型结构(单位: mm)

2.2 模型试件

为避免模型制作的困难，文献[2]取原型的1.5个开间进行缩比，即等效框架的截面宽度为原截面宽度的1.5倍(由于平面框架的抗力与其截面宽度成比例，且原型中各框架的受力完全一样，所以这样做是合理的^[2])，并按1/3的缩尺比(模型与原型的尺寸比例)形成框架试件UB-2。试件UB-2受力及截面形式如图4所示，材性参数见表1，梁柱构件尺寸、配筋参数及轴压力、无粘结筋预加应力值见表2。

表 1 试件 UB-2 材性参数

混凝土参数	普通钢筋参数	无粘结筋参数	
		ø 12	ø 18
$\sigma_{co}^0 = 37, \epsilon_{co}^0 = 0.002$	$k_1 = 4, k_2 = 25$		
$\epsilon_{cu} = 0.01$	$k_3 = 40, k_4 = 1.5$	$k_1 = 1, k_2 = 40$	$k_1 = 1, k_2 = 40$
$f_t = 3.7, \epsilon_{tu} = 0.001$	$k_5 = 1$	$k_3 = 40, k_4 = 1.2$	$k_3 = 40, k_4 = 1.3$
$E_c = E_t = 33800$	$f_y = 245$	$k_5 = 2.3$	$k_5 = 1.9$
$E_{min} = 0$	$E_s = 206000$	$f_y = 883$	$f_y = 736$
$a_s = a_s' = 25$	$f_{yh} = 245$	$E_s = 200000$	$E_s = 200000$
$a_p = a_p' = 40$	$f_{uh} = 363$		

(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 试件 UB-2 各构件尺寸、配筋及竖向力、无粘结筋预加应力大小

构件编号	尺寸 /mm	纵筋/配筋率		箍筋 /体积配筋率	无粘结筋有效预加应力 /MPa		竖向力 P_1 /kN
		普通筋	无粘结筋		左(上)侧	右(下)侧	
C-1	150×220×1580	4 ø 6	4 ø 12	ø 6@80	433	440	
		/0.39%	/1.33%	/0.90%			
C-2	150×220×1580	4 ø 6	4 ø 12	ø 6@80	452	450	14.1
		/0.39%	/1.33%	/0.90%			
B	150×220×2600	4 ø 6	2 ø 18	ø 6@80	450	443	
		/0.39%	/1.51%	/0.90%			

2.3 数值计算

为研究预应力筋粘结形式对结构滞回性能的影响, 除按模型 UB-2 (表 3 中 Case 1) 试验参数进行数值模拟外, 还对其他预应力筋粘结形式进行模拟分析, 不同预应力筋粘结形式的情况见表 3。对于有粘结预应力筋部分, 在数值模拟中认为粘结部位不发生粘结退化。表 3 中, Case5 采用文献[8]提出的部分无粘结形式, 即预应力筋沿其纵向(延伸方向)自梁端、柱端的 1/3 梁长或柱长的长度范围内采用无粘结, 其他范围则采用有粘结。

表 3 预应力筋粘结形式的情况

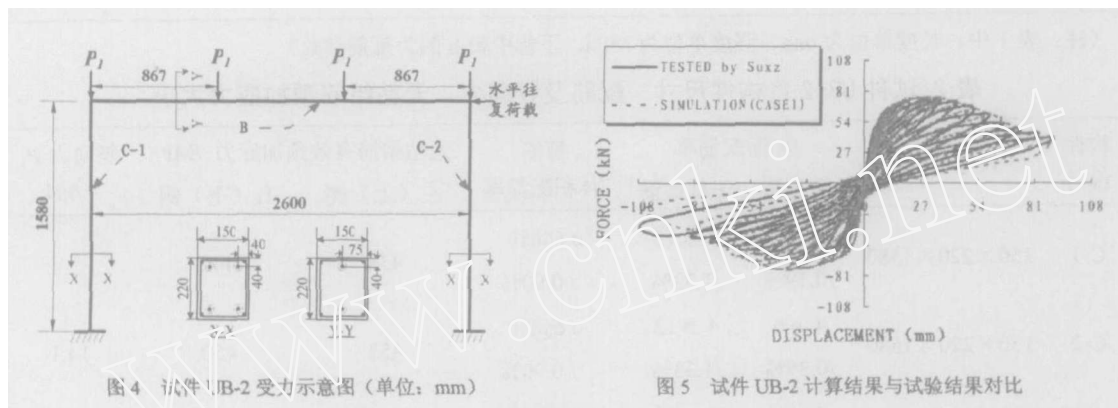
CASE	名称	粘结形式描述
CASE 1	FU-B&FU-C	梁、柱中预应力筋均为无粘结形式, UB-2 模型试验
CASE 2	FB-B&FB-C	梁、柱中预应力筋均为有粘结形式
CASE 3	FU-B&FB-C	梁中预应力筋为无粘结形式、柱中预应力筋为有粘结形式
CASE 4	FB-B&FU-C	梁中预应力筋为有粘结形式、柱中预应力筋为无粘结形式
CASE 5	PU-B&PU-C	梁、柱中预应力筋均为部分无粘结形式

(注: 表中, FU—Fully unbonded, FB—Fully bonded, PU—Partially unbonded, B—Beam, C—Column)

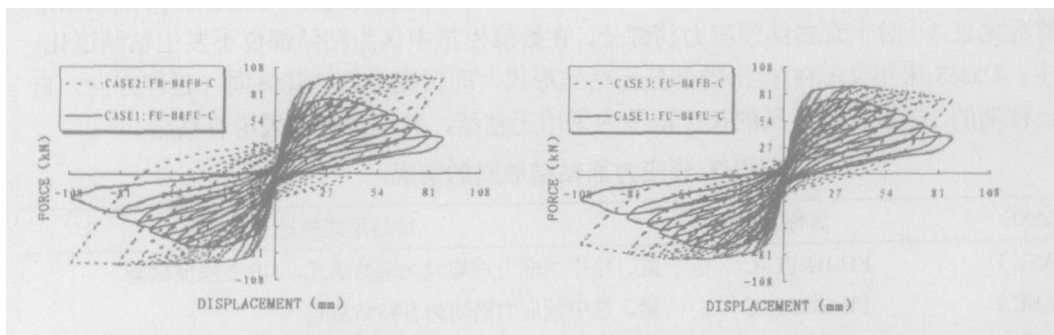
3 计算结果分析

试件 UB-2 (CASE1) 的数值模拟结果与试验结果的对比如图 4 所示, 可见二者吻合良好, 表明所采用的数值分析模型^{错误! 未找到引用源。}可准确用于预应力混凝土杆系结构滞回性能的模式。

图 6 为不同预应力筋粘结形式情况的计算结果与原无粘结预应力混凝土框架试件 UB-2 计算结果的对比如图 6 可知, 相对无粘结预应力 UB-2 情况而言, 增加预应力筋和混凝土之间的粘结可以显著增加结构的滞回耗能能力, 并可提高构件的承载力, 但也结构的残余变形也会相应。因此预应力混凝土结构抗震性能指标: 耗能能力和复位能力, 在粘结

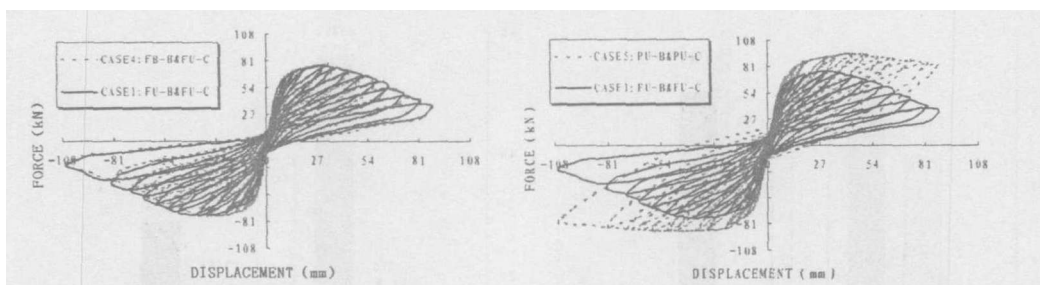


形式上是存在一定矛盾的。因此有必要对不同预应力筋粘结情况逐一加以深入讨论, 寻找合理预应力筋粘结形式。这里, 所谓复位能力是指结构在地震结束后回落到结构初始位置的能力, 可用地震后的残余变形大小表示。复位能力也是结构抗震性能的一个重要方面, 它反映了结构震后的可修复性能^[9]。



(a) CASE 1 与 CASE 2 计算结果比较

(b) CASE 1 与 CASE 3 计算结果比较



(c) CASE 1 与 CASE 4 计算结果比较

(d) CASE 1 与 CASE 5 计算结果比较

图 6 不同预应力筋粘结形式下框架计算结果与 UB-2 计算结果的比较

从图 6 (a) CASE2 的曲线对比可见, 当梁柱均采用有粘结预应力筋时, 滞回曲线变得丰满, 表现出类似于钢筋混凝土结构的滞回特性。CASE2 因梁柱中预应力筋均为有粘结形式, 与原结构 CASE1 相比承载力得到显著提高但残余变形亦显著增大。

从图 6 (b) 的 CASE3 的曲线对比可见, 当柱中采用有粘结预应力筋而梁中采用无粘结预应力筋时, 框架的滞回曲线表现出一定程度的捏拢特征。图中, CASE3 因柱中配置有粘结预应力筋, 承载力得到提高但残余变形增大。

从图 6 (c) 可见, CASE1 与 CASE4 的计算曲线几乎完全重合, 也即当柱配置无粘结预应力筋时, 无论梁中预应力筋是否有粘结, 对滞回曲线的影响不大, 均有明显的捏拢现象, 表现出典型的无粘结预应力混凝土结构的滞回特性。

从图 6 (d) 的 CASE5 与 CASE1 的滞回曲线对比可见, 当梁柱中均配置部分无粘结的预应力筋时, 框架的滞回曲线仍表现出明显的捏拢特征, 反映了结构中存在的局部无粘结行为, 且承载力也有一定程度提高。

图 7 对各框架的峰值承载力、最终残余位移及累积滞回耗能进行了比较, 其中峰值承载力和最终残余位移为正负两个方向 (图 8 第一象限和第三象限) 的平均值。由图可见, 有粘结预应力混凝土框架 CASE2 的平均峰值承载力、平均残余位移以及累积滞回耗能均最大, 而 CASE1 (即 UB-2) 均最小。比较图 7 的 CASE2 和 CASE5 可见, 二者的承载力相当, 而采取部分无粘形式的 CASE5 的残余变形明显小于有粘结形式的 CASE2, 仅为 CASE2 的 50% 左右, 但 CASE5 的累积耗能能力仅为 CASE2 的 56%。因此, 可以认为, 部分无粘结预应力混凝土结构的残余变形接近无粘结预应力混凝土结构, 且有较大的承载力和耗能能力。

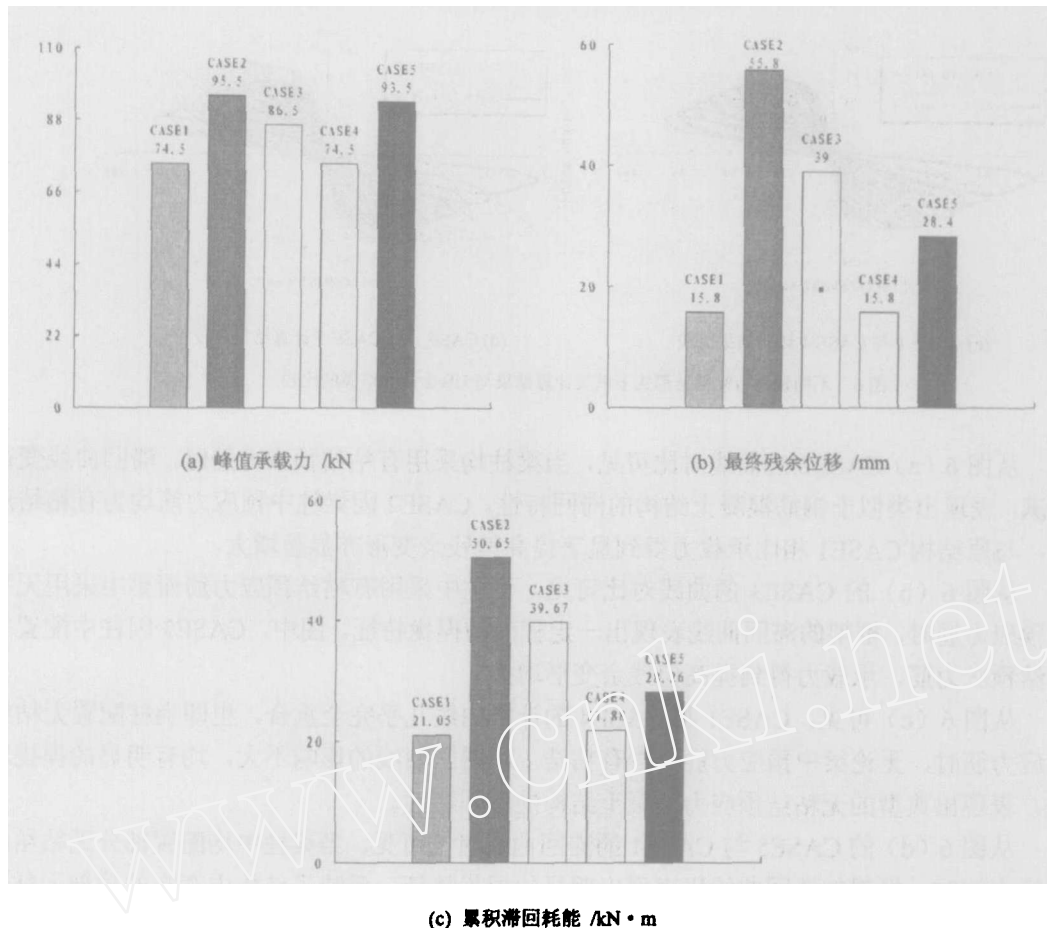


图7 峰值承载力、最终残余位移和累积滞回耗能的对比

综上所述结果, 框架柱中的预应力筋粘结形式对预应力混凝土框架的滞回特性和复位性能影响较大, 而框架梁中的预应力筋粘结形式的影响则较小。当框架柱中采用无粘结预应力筋时, 框架结构承载力最低、滞回曲线捏拢最明显、耗能能力(滞回环包围的累计面积)最小, 但复位性能最好; 当框架柱中采用有粘结预应力筋时, 框架结构承载力逐渐提高, 滞回曲线逐渐丰满、耗能能力逐渐增强, 但残余位移逐步增大、复位性能逐步变差; 当框架柱中采用部分无粘结预应力筋时, 承载力与有粘结预应力情况的承载力基本相当, 耗能能力中等, 复位性能不如无粘结框架, 但明显优于框架柱中采用有粘结预应力筋的情况。因此, 综合考虑承载力、滞回耗能等和复位性能, 采用部分无粘结预应力筋形式可获得更好的整体结构抗震性能。

4 结论

本文通过对往复荷载下5种不同预应力筋粘结形式的框架结构滞回性能的数值模拟, 得到如下主要结论:

(1) 对于预应力混凝土框架结构, 框架柱中的预应力筋粘结形式(有粘结、无粘结或部分无粘结)对于框架整体性能的影响程度大于框架梁中预应力筋粘结形式的影响;

(2) 框架结构中预应力筋由无粘结筋置换成有粘结筋时, 结构的承载力提高、耗能能力增强, 但残余变形增大、复位性能变差, 不利于震后结构的修复;

(3) 将框架柱中有粘结预应力筋置换成部分无粘结形式的预应力筋时, 框架的承载力基本不变或下降很少, 但残余变形显著减小、复位性能明显改善, 且耗能能力中等。

(4) 综合考虑承载力、复位和耗能等方面, 配置部分无粘结形式预应力筋的预应力混凝土框架结构具有最佳的整体抗震性能;

(5) 对于在往复荷载下可能存在粘结退化的有粘结预应力混凝土结构, 应采取可靠端部锚固措施, 而不必担心预应力筋粘结退化对结构抗震性能的不利影响。

参考文献

- [1] 叶列平 陆新征 马千里 汪训流 缪志伟, 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例[R], 第15届全国结构工程学术会议特邀报告, 《工程力学》增刊, 2006
- [2] 苏小卒, 预应力混凝土框架抗震性能研究[M], 上海科学技术出版社, 1998
- [3] MSC. Marc 2005 在线帮助文档[Z]
- [4] Légeron, F., and Paultre, P., Uniaxial confinement model for normal and high-strength concrete columns[J], J. Struct. Eng., ASCE, 2003, 129(2), 241-252.
- [5] 江见鲸, 陆新征, 叶列平, 混凝土结构有限元分析[M], 清华大学出版社, 2005
- [6] Esmaily, A., and Xiao, Y. (2005). "Behavior of Reinforced Concrete Columns under Variable Axial Loads: Analysis"[J], ACI Structural Journal, 102(5), 736-744.
- [7] Légeron, F., Paultre, P., and Mazar, J.(2005). "Damage Mechanics Modeling of Nonlinear Seismic Behavior of Concrete Structures,"[J] J. Struct. Eng., ASCE, 131(6), 946-954.
- [8] Prestley, M. J. N., and Tao, J. R., "Seismic Response of Precast Prestressed Concrete Frame with Partially Debonded Tensions,"[J] PCI Journal, V. 38, No. 1, Jan-Feb., pp.58-69
- [9] Fischer, G and Li, V. C. (2003). "Intrinsic response control of moment resisting frames utilizing advanced composite materials and structural elements."[J] ACI Struct. J., 100(2), 166-176.