

预应力筋粘结形式对框架复位性能的影响*

汪训流¹, 叶列平², 陆新征²

(1 中国电子工程设计院结构评估及加固所 北京 100840; 2 清华大学土木工程系 北京 100084)

[提要] 残余变形是衡量结构震后能否继续满足使用要求和可修复性的重要指标。首先提出以残余变形为目标的结构或构件复位性能的基本概念; 然后利用已开发并经试验验证的纤维模型程序, 完成了一榀预应力混凝土框架试件在不同预应力筋粘结形式下的数值模拟, 初步探讨了预应力筋粘结形式对结构复位性能的影响。计算结果表明, 对于按规范设计的预应力混凝土框架, 框架柱预应力筋粘结形式对框架的复位性能产生较大影响, 而框架梁预应力筋的影响则相对较小。据数值分析结果, 从结构整体性能角度出发, 实际工程中预应力筋宜优先采用部分无粘结形式。

[关键词] 预应力混凝土 框架结构 纤维模型 粘结形式 复位性能 部分无粘结

Analysis to Influence by Bonding Styles of Prestressed Strands/Steels on Re-centering Behavior of Prestressed Concrete Frames

Wang Xunliu¹, Ye Lieping², Lu Xinzheng²

(1 China Electronics Engineering Design Institute, Beijing 100840, China; 2 Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Residual deformation is a key index to assess whether a structure can be reused or restored after an earthquake. In this paper, a PC frame has been simulated with various bonding styles of PS by a fiber model program developed and validated with test data in this study, and some simple discussions on the effect on re-centering behavior of the bonding styles of PS have been given. The results of simulation indicate that, as to PC frames designed according to codes in existence, the bonding style of PS used for columns has great influence on the re-centering behavior of PC frame, while the PS of beams have relatively little effect. According to the numerical results and considering the entire performance of PC frames, it should take priority to use the partially debonding style of PS in the engineering practice.

Keywords: prestressed concrete; frame structure; fiber model; bonding style; re-centering behavior; partially debonded

0 引言

结构震后残余变形过大, 会因为无法修复到正常使用状态而被最终拆除。如 1995 年日本阪神大地震中, 因残余位移角超限, 约 100 个桥柱被拆除重建^[1], 严重阻碍了公路桥梁的恢复通行, 并造成重建费用的大幅增加。

在房屋建筑中, 虽然钢筋混凝土 (RC) 框架结构按“强柱弱梁”原则设计, 但柱底塑性铰的出现难以避免^[2], 尽管首层柱底出铰不会导致结构倒塌, 但 RC 柱较大的残余变形会给结构震后修复带来很大困难。

文[3]指出, 残余位移 (变形) 对震后结构修复难度的重要性程度是否会大于通常最受关注的最大位移 (变形) 值得探讨, 首次明确提出了残余变形对震后结构可修复性的影响问题。因此, 残余变形影响结构震后的使用性能和可修复性, 对结构残余变形及其控制的研究, 也是现有基于性能抗震设计理论^[4]研究的重要内容之一。基于现有研究^[5-8],

对以残余变形为目标的结构或构件的复位性能进行了分析研究。

1 复位性能与复位能力

荷载作用卸载后, 结构或构件具有使自身从荷载作用时的最大变形状态向荷载作用前的初始状态回复的能力, 将结构或构件的这种向初始状态回复的能力称为“复位能力”, 并称这种性能为结构或构件的“复位性能”。

结构或构件的复位能力与其变形能力既有联系又有区别。变形能力是指在维持一定承载能力的情况下结构或构件所能承受的最大变形, 是目前基于位移抗震设计方法的研究重点。而复位能力则以结构或构件的残余变形为目标, 同时考察相应的最大变形, 所以复位能力的研究是对基于位移抗震设计方法研究的发展和补充。为反映复位能力大小, 定义复位能力系数 γ :

$$\gamma = 1 - \frac{D_r}{D_m} \quad (1)$$

*高等学校博士学科点专项科研基金资助课题, 编号 20040003095

式中, D_r 为结构或构件在荷载作用后的残余变形, D_m 为结构或构件在荷载作用(同一荷载循环)时的最大变形。复位能力系数 γ 反映了结构或构件复位能力的大小, γ 越大则复位能力越大, 一般 $0 \leq \gamma \leq 1$ 。通常 $\gamma > 0$, 除非结构倒塌破坏; 而当 $\gamma = 1$ 时 $D_r = 0$, 表明结构或构件具有完全复位能力, 如弹性受力状态时的结构或构件。

2 数值计算与分析

利用数值分析模型^[5-7], 对文[8]的一榀无粘结预应力混凝土框架试件(UB-2)进行不同预应力筋粘结形式下的数值模拟。

2.1 数值分析模型简介

已开发的数值分析模型^[5-7], 是依托非线性有限元分析软件 MSC.MARC^[9]进行二次开发的基于纤维模型的杆系结构或构件有限元分析程序。计算时, 采用空间梁单元对结构或构件进行离散, 单元的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。

材料本构关系见图 1^[5-7]。图中混凝土受拉、受

压单调加载包络线分别选取 Légeron-Paultre 模型^[10]和江见鲸模型^[11], 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 Esmaily-Xiao 模型^[12], 卸载曲线为直线, 再加载曲线选用 Légeron 模型^[13], 本构关系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。

有限元建模见图 2^[5,6]。图中, PC(预应力混凝土)构件为一根在截面中心左侧配置面积为 A_p , 偏心距为 e_p 的直线预应力筋的构件, 被分成 RC(钢筋混凝土)和 PS(预应力筋)两部分进行独立建模。L-RA, L-CP 分别为刚臂连接键和耦合连接键, 分别模拟预应力筋与混凝土间的端部锚固及内部连接。对于多根直线预应力筋情形, 可按照各预应力筋及其偏心距逐个(或分组)进行如图 2 的相似处理; 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, 之后即可按照图 2 同样原理进行建模。

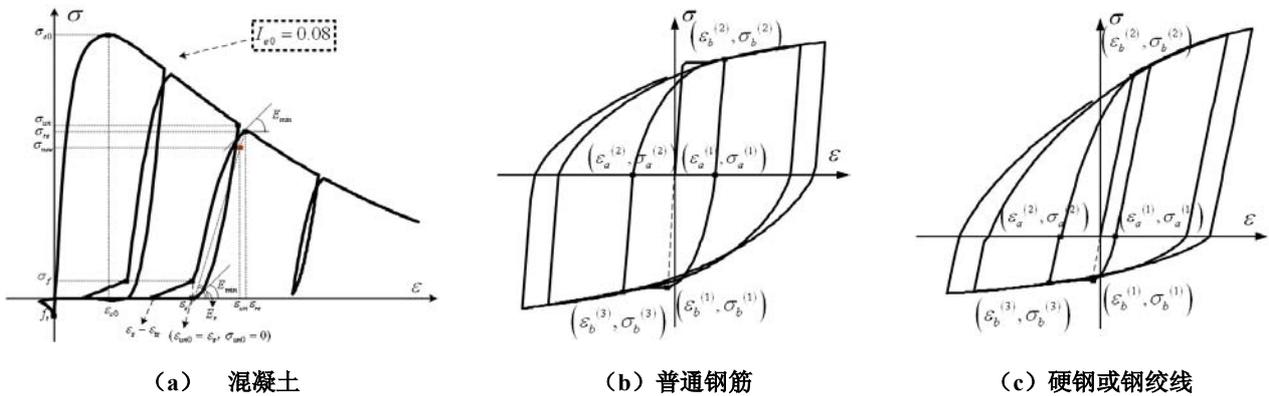


图 1 材料本构关系^[5-7]

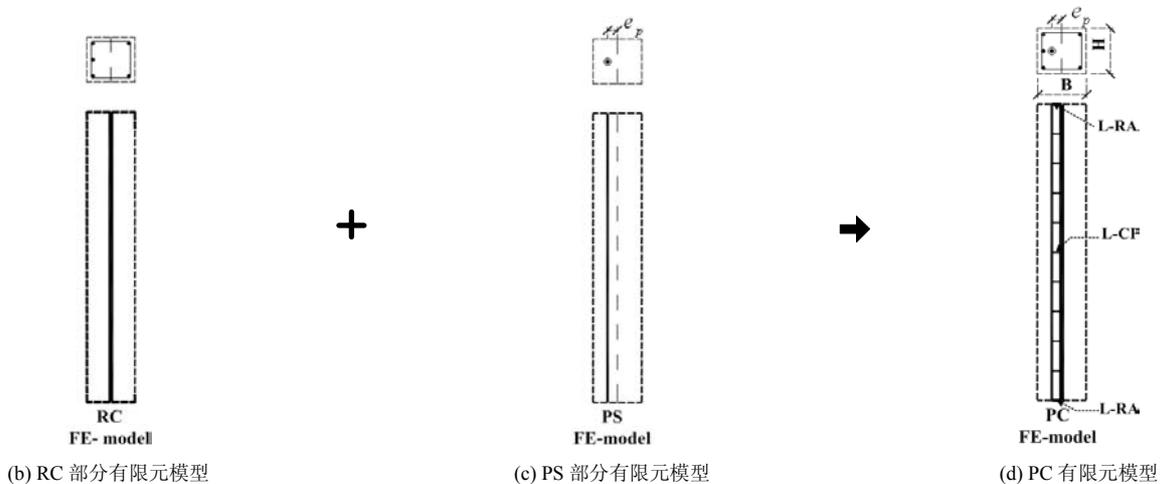


图 2 PC 构件的有限元模型^[5,6]

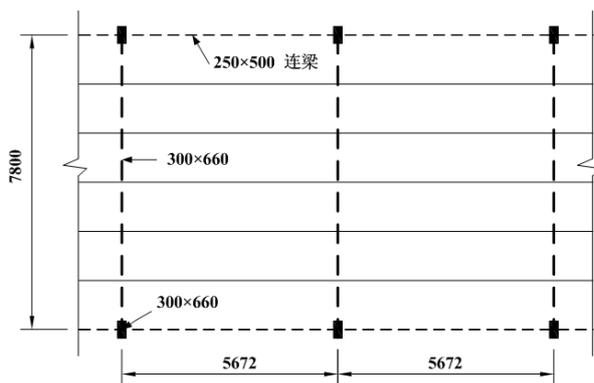


图3 原型结构 (单位 mm)^[8]

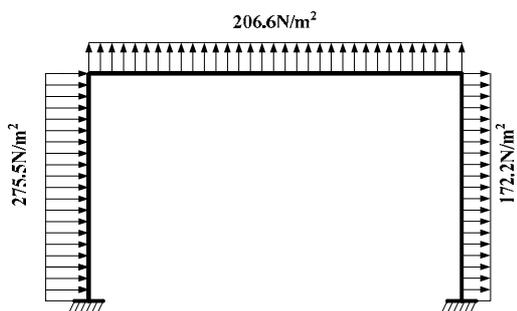


图4 风荷载^[8]

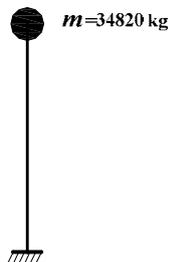


图5 抗震设计
计算模型^[8]

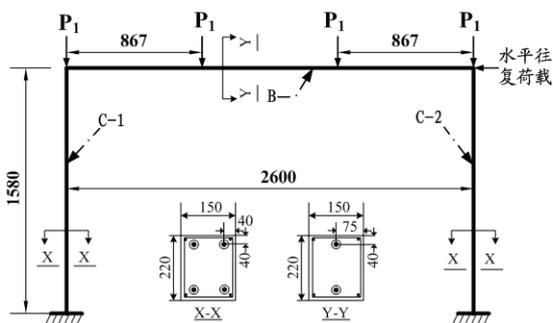


图6 试件 UB-2 受力示意图 (单位 mm)^[5]

2.2 原型结构与模型试件

文[8]选择单层单跨预应力混凝土框架作为研究对象。原型为图3所示的结构,层高4.74m,按上海地区情况设计。屋面恒载为 4.61kN/m^2 ,屋面活载为 1.47kN/m^2 (不包括风载),风载如图4所示。抗震设计的计算模型如图5所示。对原型分别算出恒载、活载、风载与地震力组合的质量 m 所产生的垂直荷载及水平地震力(按Ⅲ类场地、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, $m=34820\text{kg}$ 。模型和原型的设计均符合规范TJ 10-74^[14]和TJ11-78^[15]的要求。

为避免模型制作的困难,文[8]取原型的1.5个开间来缩比,对这1.5个开间,取其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^[8]),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6所示,材性参数、各构件尺寸、配筋参数及轴压力和无粘结筋预加应力大小见文[5,8]。

2.3 数值计算与结果

数值计算时,预应力筋各粘结形式见表1,并认为有粘结的部位不发生粘结退化。表中,情况5的部分无粘结形式^[16]中,分别将预应力筋沿其纵向

(延伸方向)自梁端、柱端的1/3梁长、柱高的长度范围内施行无粘结,其他范围则采用有粘结。

计算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)和普通纵筋数目相同的普通钢筋纤维。构件的预应力筋(PS)部分首先按照其位置归类分组,每组PS按等面积原则等效为1根PS纤维,纤维的中心位置即等效预应力筋的中心,按图2方法建模,多组PS要建多个PS有限元模型。

预应力筋粘结形式列表 表1

情况	名称	粘结形式描述
情况1	FU-B&FU-C	梁、柱中预应力筋均为无粘结形式
情况2	FB-B&FB-C	梁、柱中预应力筋均为有粘结形式
情况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
情况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
情况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无粘结,FB有粘结,PU部分无粘结,B梁,C柱

计算结果如图 7-10 所示。其中, 图 7 为荷载-位移曲线的对比, 图 8 为复位能力系数的比较, 图 9 为承载力的对比, 图 10 为每周滞回耗能的比较(图

8 和图 9 均取正负加载端的平均值)。

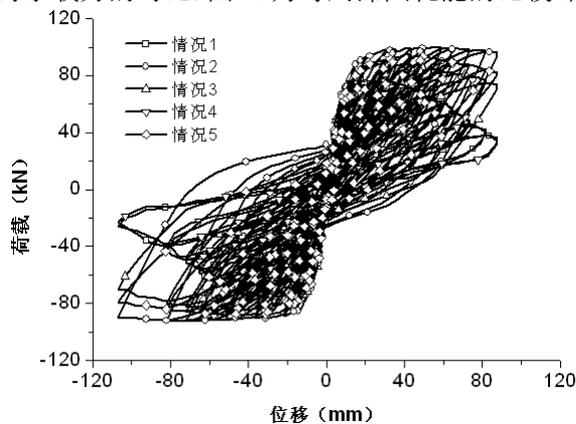


图 7 荷载-位移曲线

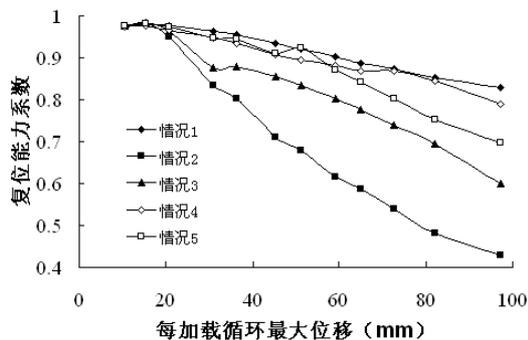


图 8 复位能力系数

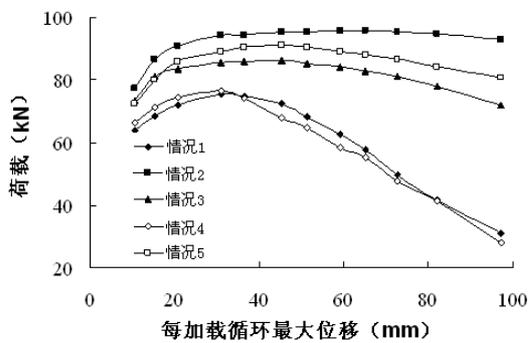


图 9 承载力

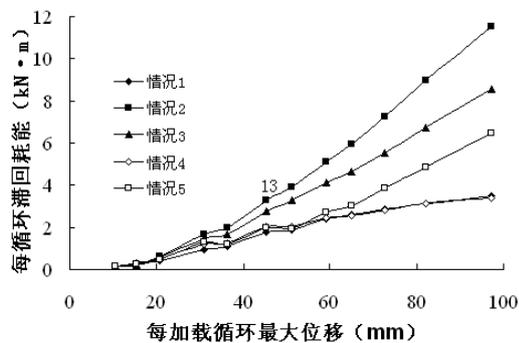


图 10 滞回耗能

2.4 计算结果分析

整体考察图 7-10 可知, 相对无粘结预应力构件而言, 增加预应力筋和混凝土之间的粘结可以显著增加滞回耗能, 适当提高构件的承载力, 但也会减小构件的复位能力系数(即增大构件的残余变形)。因此, 耗能能力和复位能力在粘结形式上存在一定矛盾, 有必要逐一加以深入讨论寻找最优解。

就复位性能而言, 由图 9 可见, 对于梁柱均配置有粘结预应力筋的情况 2, 框架的复位能力系数显著减小; 即使是仅柱中配置有粘结预应力筋的情况 3, 相比梁柱中均配置无粘结预应力筋的情况 1, 结构的复位能力系数仍有大幅度减小; 而仅梁中配置有粘结预应力筋的情况 4 则与情况 1 具有大小相当的复位能力系数; 对于梁柱中均配置部分无粘结形式预应力筋的情况 5, 框架却获得了比情况 2 和情况 3 大得多的复位能力系数。因此, 按规范^[14,15]设计的预应力混凝土框架, 相比梁中预应力筋粘结形式, 柱中的预应力筋粘结形式对整个框架的复位性能具有更大影响。

就承载力和滞回耗能而言, 由图 9 和图 10 可见, 对于柱中配置有粘结预应力筋成分的框架结构

(情况 2、情况 3、情况 5), 结构的承载力和滞回耗能能力显著提高; 而柱中配置无粘结预应力筋的框架结构(情况 1、情况 4), 无论其梁中配置何种形式的预应力筋, 都具有大小相当的承载力和滞回耗能, 且数值明显小于其他 3 种形式的框架结构。因此, 按规范^[14,15]设计的预应力混凝土框架, 相比梁中预应力筋粘结形式, 柱中的预应力筋粘结形式对整个框架的承载力和滞回耗能具有更大影响。

综合比较可见, 对于按规范^[14,15]设计的预应力混凝土框架, 框架柱预应力筋的粘结形式对预应力混凝土框架的滞回特性特别是复位性能影响较大而框架梁的影响则较小。框架柱中配置无粘结预应力筋时, 框架承载力最低、滞回曲线捏拢最明显、耗能能力(滞回环包围的累计面积)最差, 但复位性能最好。框架柱中配置有粘结预应力筋时, 框架承载力逐渐提高, 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。框架柱中配置部分无粘结预应力筋时, 框架的承载力与有粘结预应力框架承载力基本相当, 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

配置有粘结预应力筋情形。因此,综合考虑复位性能、承载力及滞回耗能等方面,配置部分无粘结形式预应力筋的预应力混凝土框架可以获得更好的整体性能。

另一方面,有粘结预应力混凝土结构在往复荷载作用下会发生粘结退化,退化后的结构将类似于部分无粘结的预应力结构,虽然承载力没有下降或下降不多,但结构的耗能能力已经大幅度降低。因此,对于有粘结预应力混凝土结构也应该同无粘结预应力混凝土结构一样采取加强结构耗能的辅助措施,提高结构的整体耗能能力,减小地震响应。

3 结论

通过往复荷载下预应力混凝土框架在5种不同预应力筋粘结形式下的数值模拟,得到如下主要结论

(1) 基于相关规范设计的预应力混凝土框架,框架柱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,因此,实际工程中为改善结构的整体性能,可考虑在柱中配置适当数量的预应力筋。

(2) 框架中预应力筋由无粘结筋置换成有粘结筋时,框架的承载力提高、耗能能力增强,但复位能力下降,不利于震后结构的修复,也不利于预应力混凝土框架结构抗震设计中“中震可修”目标的实现。

(3) 将框架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,但复位能力明显提高,而且耗能能力中等,综合考虑复位能力、承载力和滞回耗能等方面,配置部分无粘结形式预应力筋的预应力混凝土框架具有最佳的整体性能,因此,如果施工条件允许,实际工程中的预应力筋宜优先考虑采用部分无粘结形式,在受力较大部位(如梁端、柱端)一定长度(如1/3的梁跨、柱高)范围内采取无粘结形式,而其他部位采取有粘结形式。

(4) 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,应采取措施,增强结构的耗能能力。

参 考 文 献

[1] Zatar W, Mutsuyoshi H. Residual Displacements of Concrete Bridge Piers Subjected to Near Field Earthquakes. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(6): 740-749
 [2] Paulay T and Priestley M J N. *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley

and Sons Inc., 1992, 98-106
 [3] Priestley M J N. Myths and fallacy in earthquake engineering — conflicts between design and reality. *Concrete International*, 1997, 54-63
 [4] 李应斌, 刘伯权, 史庆轩. 基于结构性能的抗震设计理论研究及展望. *地震工程与工程振动*, 2001, 21(4): 73-79
 [5] 汪训流, 叶列平, 陆新征. 往复荷载下预应力混凝土框架的数值模拟. *工程抗震与加固改造*, 2006, 28(6): 25-29
 [6] 汪训流. 配置高强钢绞线无粘结筋混凝土柱复位性能的研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2007
 [7] 汪训流, 陆新征, 叶列平. 往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟. *工程力学*, 2007, 24(12): 76-81
 [8] 苏小卒. 预应力混凝土框架抗震性能研究, 上海科学技术出版社, 1998
 [9] MSC. Marc 2005 在线帮助文档
 [10] Légeron, F., and Paultre, P., Uniaxial confinement model for normal and high-strength concrete columns, *J. Struct. Eng., ASCE*, 2003, 129(2), 241-252.
 [11] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析, 清华大学出版社, 2005
 [12] Esmaily, A., and Xiao, Y. (2005). “Behavior of Reinforced Concrete Columns under Variable Axial Loads: Analysis”, *ACI Structural Journal*, 102(5), 736-744.
 [13] Légeron, F., Paultre, P., and Mazar, J.(2005). “Damage Mechanics Modeling of Nonlinear Seismic Behavior of Concrete Structures,” *J. Struct. Eng., ASCE*, 131(6), 946-954.
 [14] 中华人民共和国国家标准. 钢筋混凝土结构设计规范 TJ 10-74, 1974
 [15] 中华人民共和国国家标准. 工业与民用建筑抗震设计规范 TJ 11-78, 1978
 [16] Prestley, M. J. N., and Tao, J. R., “Seismic Response of Precast Prestressed Concrete Frame with Partially Debonded Tensions,” *PCI Journal*, V. 38, No. 1, Jan-Feb., pp.58-69