

预应力混凝土框架结构“强柱弱梁” 设计方法研究*

张耀庭[†], 杨力, 张江

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:针对预应力混凝土框架梁设计方法的特殊性,本文以8度区(0.2g)抗震等级为二级的多层多跨预应力混凝土框架结构为例,研究规范对预应力混凝土框架结构柱端弯矩增大系数取值的合理性,提出以梁端实际抗震受弯承载力调整柱端弯矩的方法进行预应力混凝土框架结构设计,分别以梁端地震组合弯矩和梁端实际抗震受弯承载力调整柱端弯矩设计8榀预应力混凝土框架,在OpenSees中建立其基于纤维梁柱单元的数值分析模型,并对其进行静力弹塑性分析与动力时程分析.研究表明:按现行规范设计的预应力混凝土框架结构,在罕遇地震下底层柱端出铰严重,提高其柱端弯矩增大系数,可以有效地改善结构屈服机制;04规程中柱端弯矩增大系数的取值偏小,规程修订时应给予适当提高,对抗震等级为二级的预应力混凝土框架结构,其柱端弯矩增大系数的取值 ≥ 2.0 ;本文建议二级PC框架按梁端实际抗震受弯承载力调整柱端弯矩,其取值为1.4.

关键词:强柱弱梁;抗震设计;预应力混凝土框架;Pushover分析;屈服机制

中图分类号:TU378

文献标志码:A

Research on the Design Method of Strong Column and Weak Girder of Prestressed Concrete Frame

ZHANG Yaoting[†], YANG Li, ZHANG Jiang

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For the particularity of design method of prestressed concrete frame beam, this paper took a prestressed concrete frame structure in the 8-degree (0.2g) seismic grade district as an example to study the rationality of moment amplification factors at column ends in the current code, and a design method that the prestressed concrete frame columns could be designed on the basis of the actual seismic flexural moment of the beam was also proposed. Eight prestressed concrete frames were designed according to the combined moment and actual seismic flexural moment. The static elasto-plastic analysis and dynamic elastic-plastic analysis were then carried out for the frame structures in OpenSees using fiber elements. Research shows that the prestressed concrete frame designed by using the current code has serious hinges at the first floor columns under rare earthquake. The seismic performance of yield failure mechanism of the structures was effectively improved with the increment of the factor. Moreover, as the value of moment

* 收稿日期:2015-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278218), National Natural Science Foundation of China(51278218)

作者简介:张耀庭(1965-),男,湖北红安人,华中科技大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: zyt1965@mail.hust.edu.cn

amplification factors at column ends is low in 04 specification, it should be improved in the new specification. This paper recommends that for the prestressed concrete frame with second level seismic requirement, the moment amplification factors at column ends should be increased in the revision of code for seismic design of prestressed concrete structures, and on the basis of the combined moment at beam ends, the factor should be higher than 2.0, while on the basis of the actual seismic flexural moment, the factor should be 1.4.

Key words: strong column and weak girder; earthquake resistance design; prestressed concrete frame; Pushover analysis; yield failure mechanism

“强柱弱梁”是在结构抗震设计时使柱端弯矩强于同一节点的梁端弯矩,结构在遭遇强烈地震作用时,梁端会先于柱端屈服,耗散地震能,从而减小柱发生破坏的可能性,降低结构发生整体倒塌的概率^[1].为了使框架结构具有足够的变形与耗能能力及合理的破坏机制,各国规范^[2-5]都给出了相关的计算方法和构造要求,以实现“强柱弱梁”的延性要求.我国规范^[6-8]针对不同抗震等级的框架,采用不同的柱端弯矩增大调整方法来提高柱抗弯承载力,对于一级的框架结构按梁端实际抗震受弯承载力调整柱端弯矩.对比各国规范“强柱弱梁”的措施发现,中国规范取值偏低^[9].因此,在一定程度上改进我国规范“强柱弱梁”的设计方法,有助于提高框架结构的抗震性能^[10].

我国规范进行预应力混凝土框架结构的设计时,其设计方法存在特殊性,即预应力梁按抗裂要求配置预应力筋,由预应力度配置非预应力筋,并非按梁端地震组合弯矩进行预应力梁配筋^[11].针对这样的设计,有关文献指出:梁内仅预应力筋就基本可以满足各种荷载组合下的受弯承载力,甚至还有富余^[12],若再考虑梁内普通纵筋和现浇楼板内同方向钢筋的影响,则预应力梁在该处的受弯承载力,将远大于各种内力组合所要求的承载力^[13].由此可知,04规程中,按梁端组合弯矩调整柱端弯矩的设计方法^[14-15]是否合理,柱端弯矩增大系数的取值^[16-17]是否恰当,均需要进一步研究.

众所周知,指导预应力混凝土抗震设计的《预应力混凝土结构抗震设计规程》(简称04规程)是以GB50011-2001(简称01抗震规范)为基础编写的,然而在抗震实施新规范的情形下,与之相对应的预应力混凝土抗震设计规程,则并未修订.这就给抗震设防区的预应力混凝土框架结构的设计,带来一系列麻烦:按04规程设计时,是否需要提高柱端弯矩增大系数?直接采用GB50011-2010(简称10规

范)中的系数进行设计是否合理?为了保证新建PC框架的使用安全,有必要进一步研究柱端弯矩确定方法的合理性,及其对多层预应力混凝土框架抗震能力与耗能机制的影响.

为此,本文首先参照10规范中二级框架柱端弯矩增大系数的取值,探讨抗震等级为二级的PC框架柱端弯矩增大系数的合理取值,同时参考10规范中抗震等级为一级的框架结构设计方法,提出以梁端实际抗震受弯承载力调整柱端弯矩的方法,并对该调整系数的合理取值进行研究.即分别以梁端地震组合弯矩与梁端实际抗震受弯承载力调整柱端弯矩,共设计8榀预应力混凝土框架结构(每种4榀),在OpenSees中建立其基于纤维梁柱单元的数值分析模型,对其进行Pushover分析与动力弹性时程分析,通过计算结果的对比分析,研究预应力混凝土框架结构柱端弯矩调整系数的合理取值及其对结构抗震性能的影响,并探讨预应力混凝土框架结构“强柱弱梁”设计时,以梁端实际抗震受弯承载力调整柱端弯矩设计方法的可行性.

1 预应力混凝土框架设计

如上所述,本文设计8榀三层两跨预应力混凝土框架,抗震设防烈度为8度(0.2g),设计地震分组第一组,II类场地.根据抗震规范,场地特征周期是0.35s,结构抗震等级为二级,阻尼比取为0.03.

结构的梁、柱混凝土强度等级为C40,纵筋采用HRB400钢筋,箍筋采用HPB300钢筋.框架梁预应力筋采用四段二次抛物线形,选用 Φ^s 15.2高强低松弛钢绞线,其抗拉强度标准值是1860MPa,预应力筋线性布置见图1.屋面、楼层板厚均取120mm,经计算楼面恒荷载取4.65kN/m²,活荷载取6.0kN/m²,楼面梁上线荷载取10kN/m,屋面恒载取7.15kN/m²,活荷载取为2.0kN/m²,屋面梁上线

荷载取 2.5 kN/m。由于全国各地基本风压范围差别较大,并且风荷载在多层结构中一般不起控制内力作用,对配筋量的影响不大,所以在本文的框架结构设计中均没有考虑风荷载。通过计算最终确定结构的平面布置及主要构件尺寸分别见图 2 和图 3。

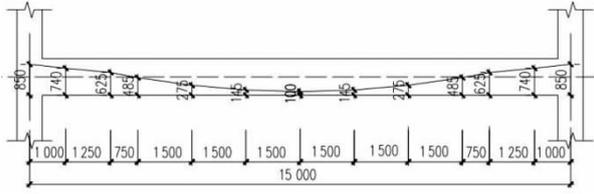


图 1 预应力筋线型布置示意图
Fig. 1 The diagram of prestressed reinforcement arrangement

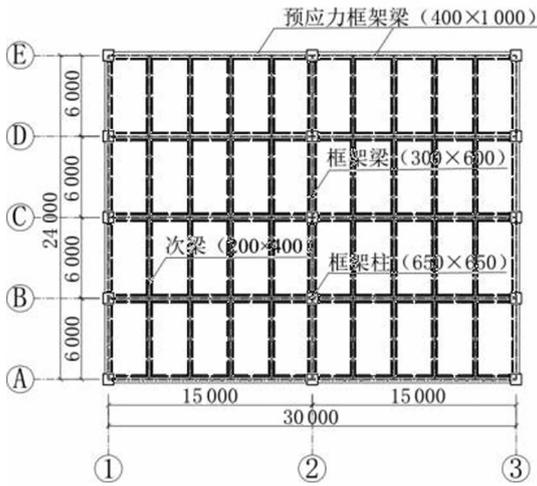


图 2 结构平面布置图
Fig. 2 The diagram of structure layout

预应力混凝土框架结构设计时,先在 PKPM 中对整体框架建模,按照三级抗裂等级进行预应力梁

设计,裂缝控制宽度为 0.2mm。由于结构平面布置规则,选取中间 C 轴上的框架进行分析。8 榀框架模型的设计原则如下:

1)首先依据 04 技术规程,采用增大梁端地震组合弯矩得到柱端弯矩的方法,设计出框架 YKJ01,其柱端弯矩增大系数参考 10 规范二级框架结构的取值 1.5;在 YKJ01 的基础上,分别提高柱端弯矩增大系数至 1.8,2.0,2.4,设计出框架 YKJ02, YKJ03 和 YKJ04。

2)根据梁端实配钢筋计算梁端实际抗弯承载力 $\sum M_{bua}$,以 $\sum M_{bua}$ 作为梁端弯矩调整柱端弯矩,柱端弯矩调整系数分别取 1.0,1.1,1.2 和 1.4,设计出另外 4 榀框架,即:YKJ05~YKJ08,详见表 1。

经计算与验算,8 个框架的预应力度、裂缝宽度、挠度、轴压比等均满足相关规范与规程的要求,各框架柱的配筋信息见表 2。

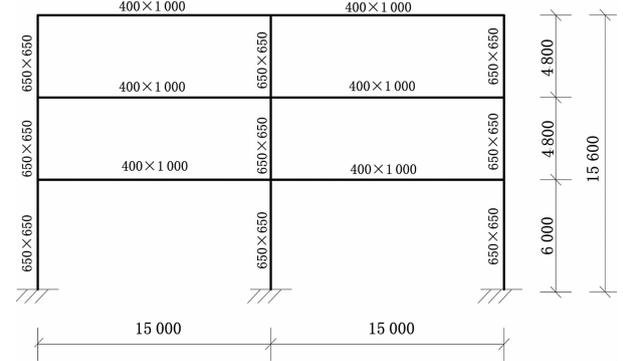


图 3 结构构件尺寸示意图(单位:mm)
Fig. 3 The diagram of structural scantlings(Unit:mm)

表 1 柱端弯矩增大系数取值
Tab. 1 Value of moment amplification factors at column ends

框架编号	YKJ01	YKJ02	YKJ03	YKJ04	YKJ05	YKJ06	YKJ07	YKJ08
梁端弯矩	梁端地震组合弯矩 $\sum M_b$				实配梁端抗震受弯承载力 $\sum M_{bua}$			
柱端弯矩增大系数	1.5	1.8	2.0	2.4	1.0	1.1	1.2	1.4

表 2 YKJ01~YKJ08 柱配筋情况
Tab. 2 The reinforcement information of columns in YKJ01~YKJ08

框架实配钢筋	1 层		2 层		3 层	
	边柱	中柱	边柱	中柱	边柱	中柱
YKJ01	8C25	6C25	9C25	6C25	9C25	6C25
YKJ02	2C22+8C25	6C28	2C22+8C28	6C28	2C22+8C28	6C28
YKJ03	2C22+8C28	2C22+6C28	10C28	2C22+6C28	10C28	2C22+6C28
YKJ04	11C28	2C22+8C28	2C25+11C28	2C22+8C28	2C25+11C28	8C28
YKJ05	6C28+2C25	6C28+2C22	8C28+2C22	6C28+2C22	8C28+2C22	6C28
YKJ06	8C28+2C22	8C25+2C28	10C28	8C25+2C28	9C28+2C22	7C28
YKJ07	10C28	10C28	10C28+2C22	10C28	10C28+2C22	8C28
YKJ08	12C28	10C28+2C25	12C28+2C22	10C28+2C25	12C28+2C22	10C28

2 预应力混凝土框架数值建模

本文以 OpenSees^[18] 软件为平台, 建立各平面框架的有限元模型. 采用杆系模型, 在建模过程中, 不考虑填充墙和楼板作用, 梁柱节点按固结处理, 混凝土采用 Concrete01 材料, 不考虑混凝土受拉, 考虑箍筋约束对核心混凝土加强作用, 其本构采用 Kent-Scott-Park 本构模型, 表 3 给出梁柱保护层混凝土及核心混凝土本构模型参数; HRB400 钢筋采用 Steel02 材料, 其本构采用基于 Menegotto-Pinto 的钢筋本构模型; 预应力筋采用考虑捏拢效应、卸载刚度退化的单轴 Hysteretic 材料.

表 3 混凝土本构参数
Tab. 3 Concrete constitutive parameters

	峰值应力 /MPa	峰值应变	极限应力 /MPa	极限应变
保护层混凝土	36.05	0.002	0	0.004
柱核心混凝土	38.86	0.0022	17.40	0.012
梁核心混凝土	39.27	0.0022	10.77	0.014

梁柱截面采用纤维截面, 截面纤维划分如图 4 所示. 柱考虑 P-Delta 效应, 梁、柱及预应力筋均采用非线性梁柱单元 (dispBeamColumn), 每根梁划分为 12 个单元, 底层柱划为 5 个单元, 其他层柱划为 4 个单元, 梁、柱每个单元积分点分别为 3 个和 5 个; 不考虑节点破坏和钢筋滑移; 预应力筋与梁之间采用刚臂单元连接, 增大刚臂单元的刚度来保证预应力筋单元与钢筋混凝土单元之间连接, 不考虑粘结滑移.

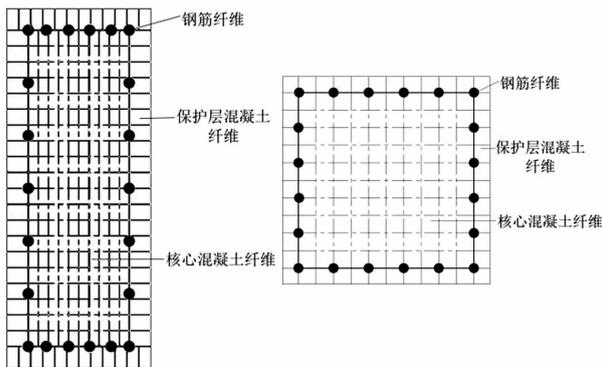


图 4 梁柱截面纤维划分示意图

Fig. 4 Fiber division of column & beam section

PKPM 与 OpenSees 计算 YKJ01 前三阶自振周期发现, 周期误差均较小, 一定程度上说明本文所建立的预应力混凝土框架模型的准确性. 如表 4.

表 4 OpenSees 与 PKPM 计算 YKJ01 前三阶周期
Tab. 4 The first three period of YKJ01 in OpenSees and PKPM

MODE	PKPM	OpenSees	误差
	周期 T_1/s	周期 T_2/s	$((T_2 - T_1)/T_1)/\%$
1	0.834	0.801	3.95
2	0.267	0.247	7.48
3	0.16	0.138	13.67

3 PC 框架静力弹塑性分析

静力弹塑性 (Pushover) 分析是结构在预先假定的一种侧向荷载作用下, 考虑结构各种非线性因素, 逐步增加侧向荷载, 直至结构达到控制位移. 该分析可以预测结构和构件在给定的地震作用下的峰值响应和抗震性能, 是结构抗震能力分析的主要方法^[19]. 本节通过 OpenSees 对 8 个预应力混凝土框架进行 Pushover 分析, 侧向荷载采用倒三角加载模式, 结构控制目标位移取结构高度 1/50.

3.1 框架能力曲线

图 5 和图 6 分别给出 YKJ01-YKJ04 和 YKJ05-YKJ08 框架 Pushover 分析顶点侧移与基底剪力曲线. 从图中发现, 按照二级框架设计方法设计的 PC 框架, 随着柱端抗弯能力级差的增大, 框架最大基底剪力增大, 基底抗侧能力增强, 而且推覆曲线后期会有下降阶段, 说明结构进入塑性阶段后, 结构变形继续增大, 但基底承受剪力减小. 依据实配钢筋后的梁端抗震受弯承载力调整柱端弯矩的方法所设计 PC 框架, 呈现相同趋势. YKJ02 和 YKJ05 最大基底剪力分别为 218 1 kN, 203 5 kN, 采用 $\sum M_c = 1.0 \sum M_{bua}$ 确定柱配筋的框架, 其抗侧能力增强幅度甚至超过 $\sum M_c = 1.8 \sum M_b$ 配筋的框架.

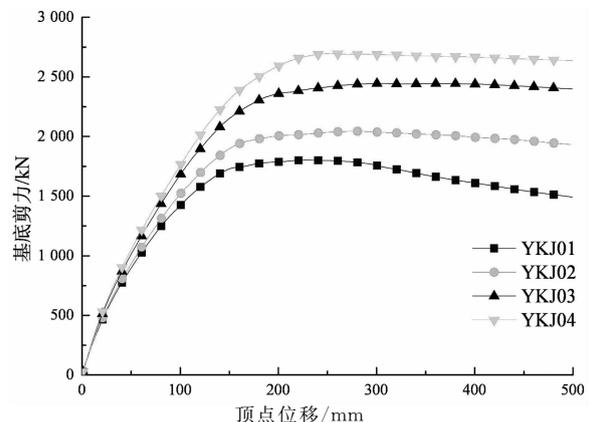


图 5 YKJ01~YKJ04 推覆曲线

Fig. 5 Pushover curves of YKJ01-YKJ04

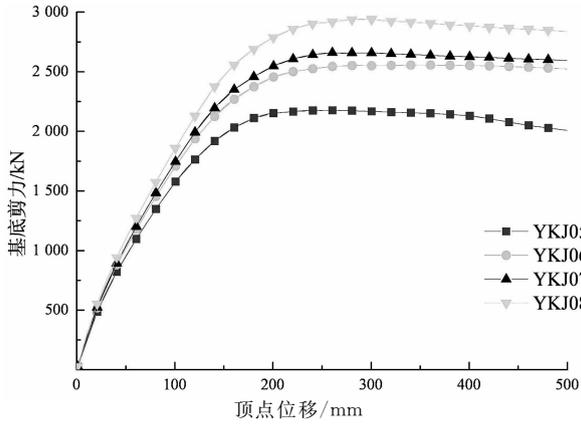


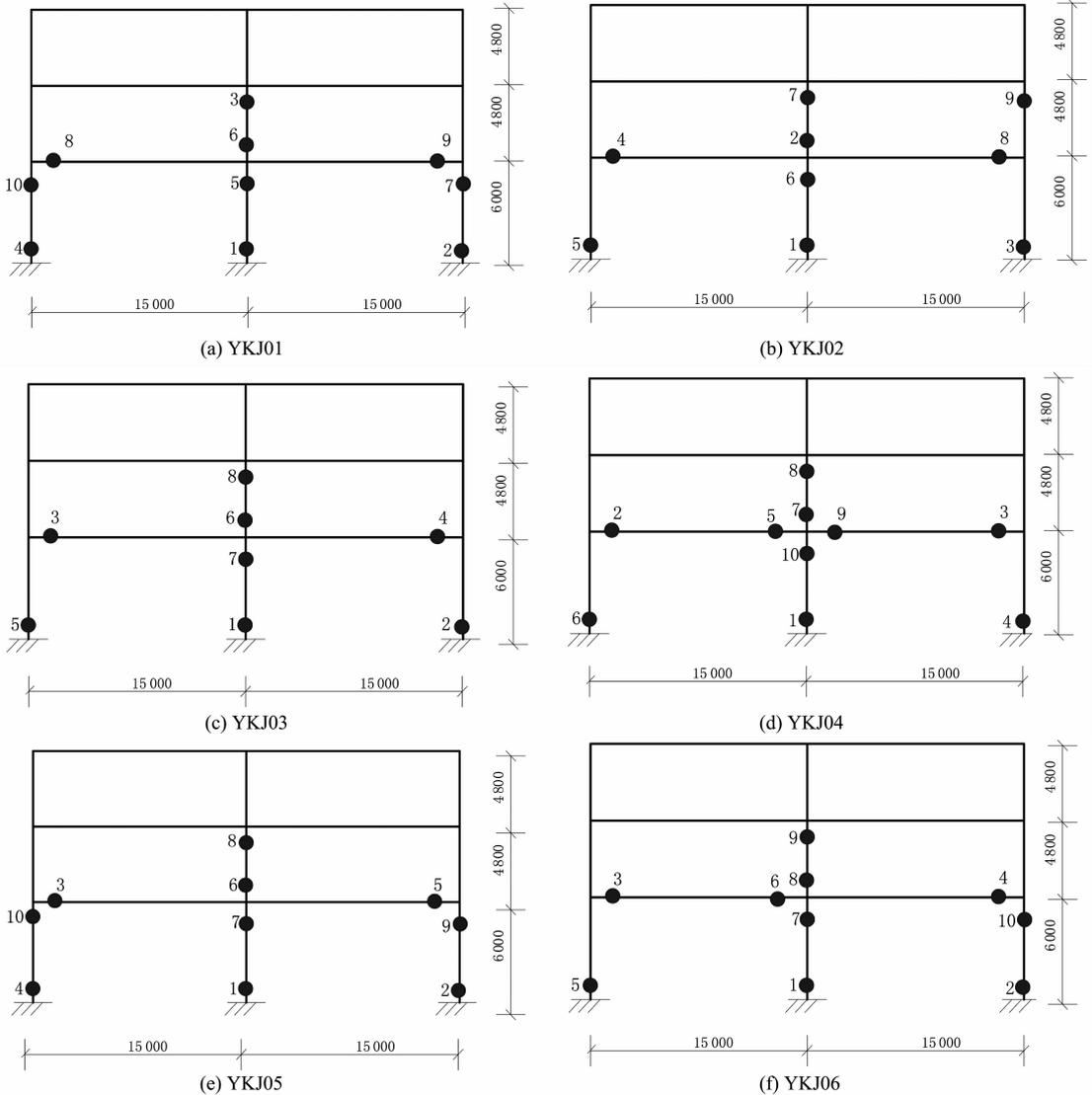
图 6 YKJ05~YKJ08 推覆曲线

Fig. 6 Pushover curves of YKJ01-YKJ04

3.2 塑性铰分布及屈服机制

本文定义梁纵向受拉钢筋屈服为梁塑性铰形成时刻,柱纵向受拉钢筋屈服或者保护层混凝土达到极限压应变点为柱塑性铰形成时刻^[20].

图 7 给出各框架 Pushover 分析杆端形成塑性铰机制,图中数字表示杆件形成塑性铰顺序.从图中看出,最先出铰位置为底层中柱柱脚,参照 10 抗震规范设计的 PC 框架底层柱上下端均出铰,梁端出铰较少,为底层屈服机制,结构抗侧移能力较差.增大柱端弯矩调幅系数,底层中柱柱底仍然最先出铰,但其它柱端塑性铰推迟出现,底层梁端陆续出现塑性铰,呈现柱底和梁端出铰的混合屈服机制.



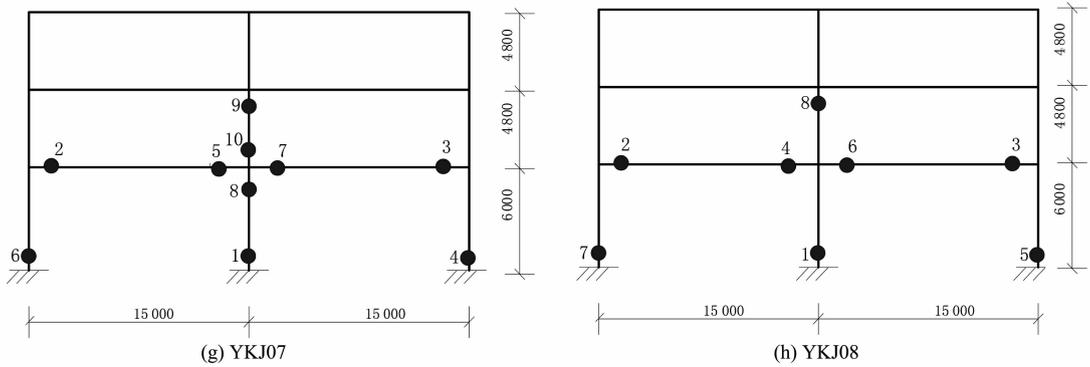


图7 YKJ01~YKJ08 塑性铰分布

Fig. 7 Plastic hinge distribution of YKJ01-YKJ08

4 PC 框架动力弹塑性分析

为进一步探讨不同柱端弯矩调整方法对预应力混凝土框架抗震性能的影响,本文在 OpenSees 中,对 8 个框架进行动力弹塑性时程分析。

4.1 地震波选取

根据规范要求,选择 3 条实际强震记录和 1 条

人工模拟地震波,利用意大利 SeismoSoft 公司研发的 SeismoMatch 与 SeismoArtif 程序进行地震波的选择与人工波的拟合^[21],地震波相关参数见表 5。各地震动加速度时程曲线见图 8,图 9 给出了所选地震波的加速度反应谱及平均反应谱,从中可看出所选地震波在理论上比较吻合频谱匹配的选波原则。

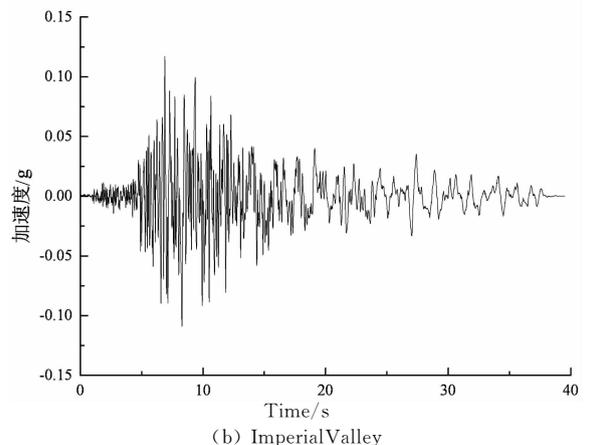
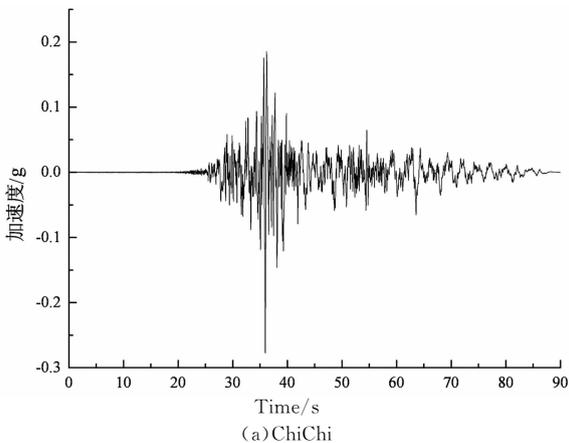
表 5 天然波与人工波信息记录表

Tab. 5 Information of natural and artificial wave

地震事件	发生时间	观测台与分量	里氏震级	加速度峰值/g	步长/s	持时/s
ChiChi	1999/09/25	CHY029	6.3	0.277	0.05	90
ImperialValley	1979/10/15	El Centro Array #13	6.53	0.117	0.05	39
LomaPrieta	1989/10/18	Anderson Dam (Downstream)	6.93	0.244	0.05	39
RG-3				0.333	0.05	30

选择地震波后,首先对 YKJ01 按 8 度区多遇地震(a_{\max} 调整到 70 cm/s^2)输入 4 条地震波进行计算,然后对每榀框架按罕遇地震(a_{\max} 调整到 400 cm/s^2)输入地震波计算分析,分析时采用瑞雷阻尼矩阵。计算预应力框架 YKJ01 在多遇地震作用下结

构的底部剪力,并与反应谱计算结果进行对比,见表 6。可以发现:满足规范规定单条时程计算的结构底部剪力不小于振型分解法计算结果的 65%,多条时程曲线下底部剪力平均值不低于振型分解法计算结果的 80%,进一步表明所选地震波满足规范要求。



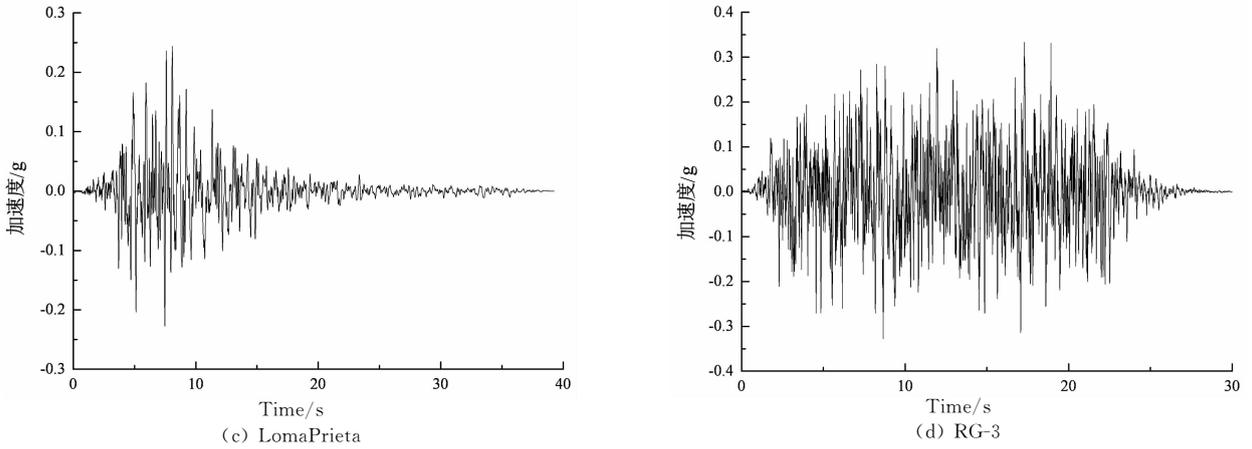


图 8 所选地震记录加速度时程曲线

Fig. 8 Acceleration time history curves of ground motion adopted

表 6 多遇地震与反应谱计算 YKJ01 基底剪力

Tab. 6 YKJ01 base shear force for frequent earthquake and response spectrum

项目	反应谱	ChiChi	ImperialValley	LomaPrieta	RG-3	四条时程平均值
基底剪力/kN	475.370	447.026	594.944	489.353	487.255	504.644
结果对比	—	94.04%	74.85%	97.06%	97.50%	93.84%

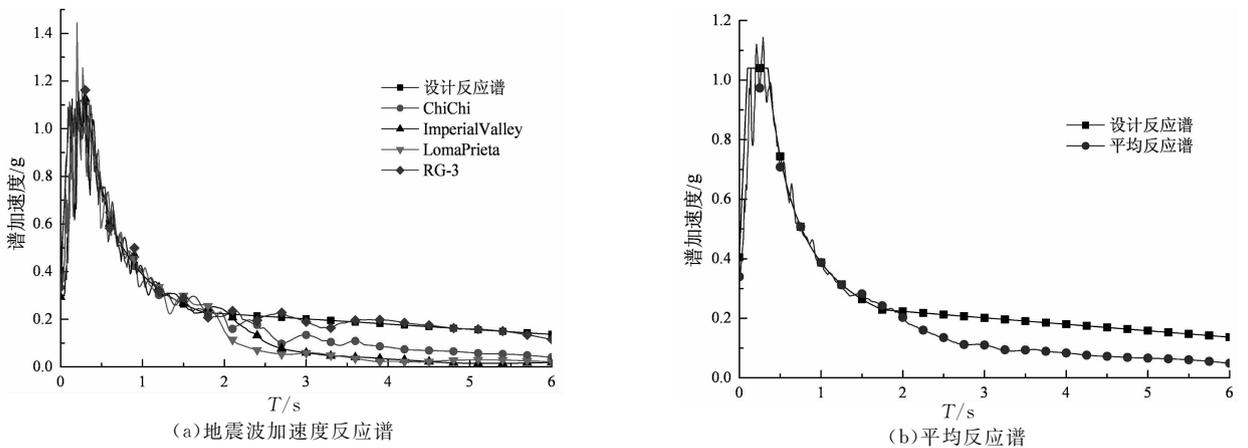


图 9 加速度反应谱

Fig. 9 Acceleration spectra of seismic waves adopted

4.2 模拟结果及分析

8 个框架在 ImperialValley 地震波作用下响应较大, LomaPrieta 和人造波 RG-3 下框架响应较接近, 而在 ChiChi 波下结构响应相对较小。

4.2.1 楼层侧移

图 10 给出各预应力混凝土框架结构楼层侧移曲线, 并给出各框架在 4 条罕遇地震动作用下楼层侧移平均值曲线。从楼层侧移平均值曲线可知, 分别按照梁端弯矩组合值和梁端实际抗弯能力设计的框架, 随着调整系数的增大, 各楼层层间侧移呈现减小的趋势, 说明提高柱端弯矩增大系数, 能提高预应力

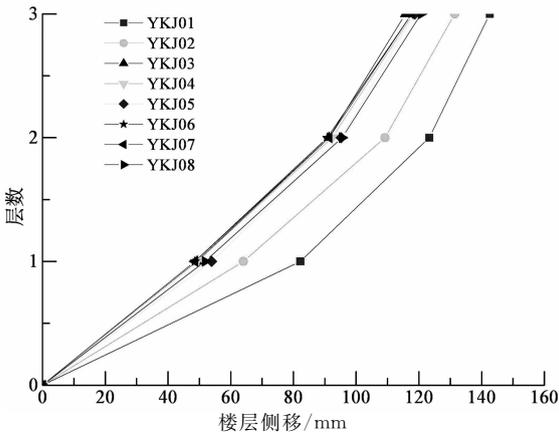
混凝土框架结构抗侧能力。

4.2.2 层间位移角

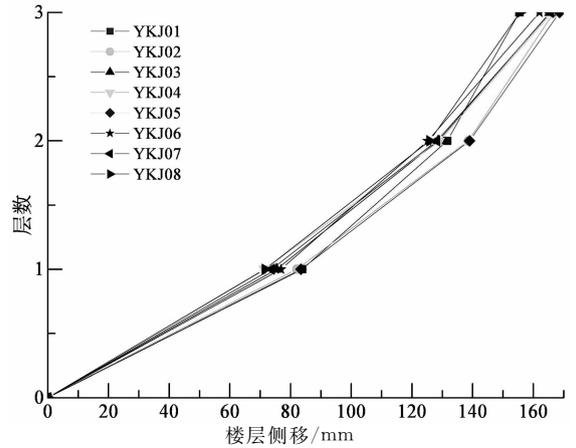
图 11 为 8 个 PC 框架各层在地震作用下最大层间位移角及各框架最大层间位移角平均值曲线。由图看出: 所有框架最大层间位移角均满足规范规定弹塑性层间位移角 0.02 限值的要求, 而且按规范设计 PC 框架底层层间位移角最大, 为结构薄弱层, 但是随着柱端弯矩增大系数的增大, 底层层间位移角呈现减小趋势, 第二层层间位移角有增大趋势, 某些框架甚至出现在某条地震波下, 二层层间位移角大于底层层间位移角的情况。可见, 增大柱端弯矩系

数,对预应力混凝土框架底层为薄弱层现状在一定程度上有改善,使框架下面两层最大层间位移角趋

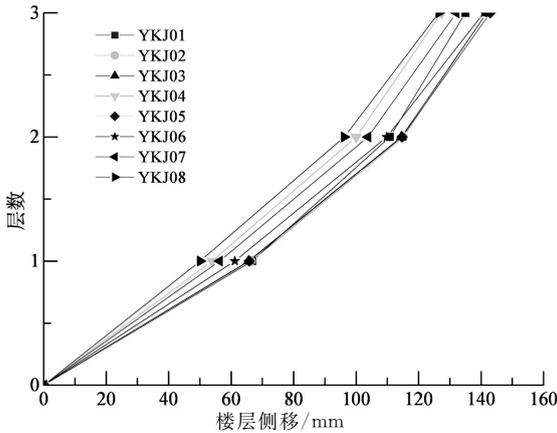
于均匀,提高了结构抗震性能.



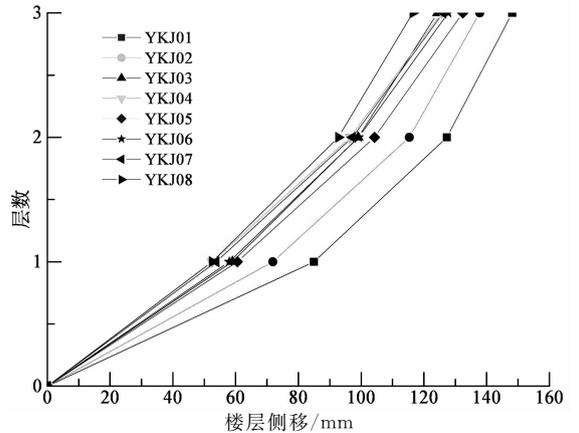
(a) ChiChi 地震波楼层侧移



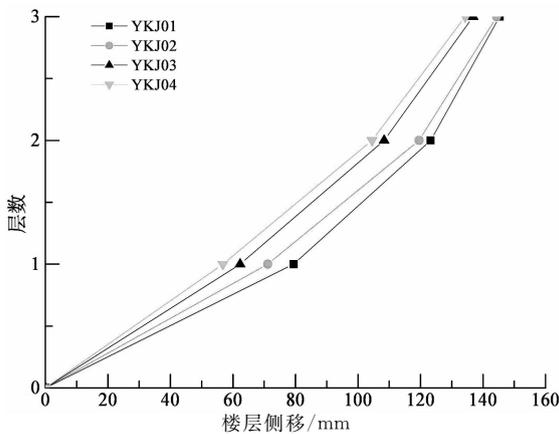
(b) ImperialValley 地震波楼层侧移



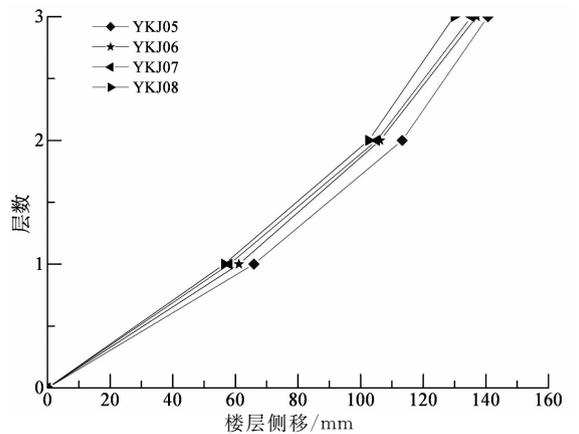
(c) LomaPrieta 地震波楼层侧移



(d) RG-3 人工波楼层侧移



(e) YKJ01-YKJ04 平均楼层侧移曲线



(f) YKJ05-YKJ08 平均楼层侧移曲线

图 10 罕遇地震下各框架最大层间侧移

Fig. 10 Maximum floor displacement for rare earthquake

4.2.3 塑性铰分布

为了说明不同柱梁抗弯能力级差措施对梁柱端塑性转动的不同控制效果,本文给出 8 个 PC 框架在 Imperial Valley 罕遇地震波下框架各杆件端部

在整个时程过程中塑性铰出现顺序,梁柱塑性铰定义方法采用与静力弹塑性分析相同的定义,图 12 中数字表示出现塑性铰顺序.

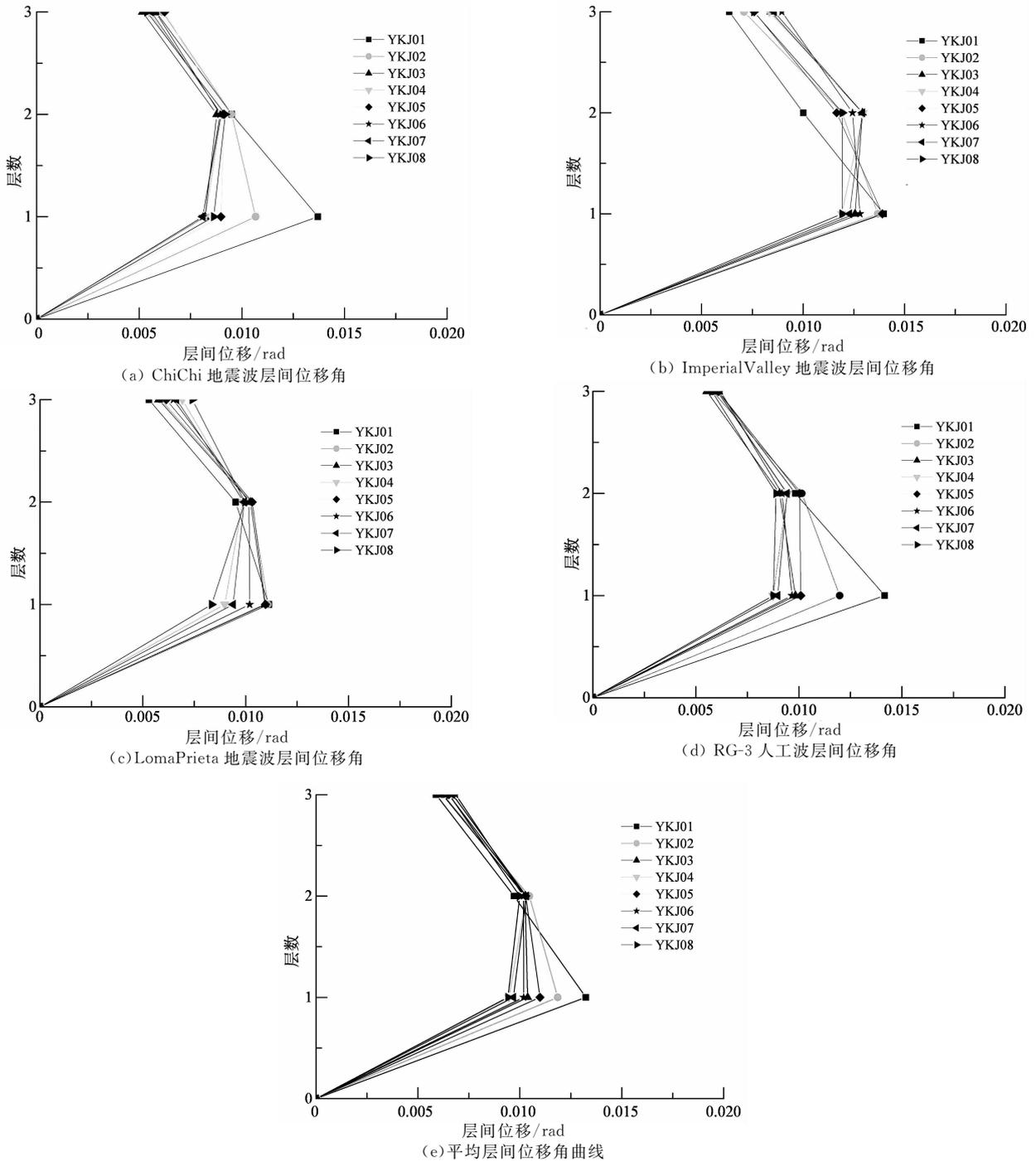


图 11 罕遇地震下各框架最大层间位移角
 Fig. 11 Maximum inter story drift ratio for rare earthquake

根据图 12 的塑性铰分布,结合其他 3 条地震波下的框架反应特性(限于篇幅,未列出)可以发现,不同柱端弯矩增大系数下框架塑性铰机构控制效果分别为:

1) 预应力混凝土框架 YKJ01 梁端没出现塑性铰,底层柱上下端全部出现塑性铰,中柱全部出绞,

为典型的层间屈服机制,底层为薄弱层首先屈服,底层屈服会导致结构整体倒塌,结构抗震性能较差,与静力弹塑性分析结论一致.充分说明参照 10 抗震规范设计的 PC 框架柱端弯矩增大系数取值较小,未能实现罕遇地震下梁铰耗能为主的屈服机制,有必要进一步提高.

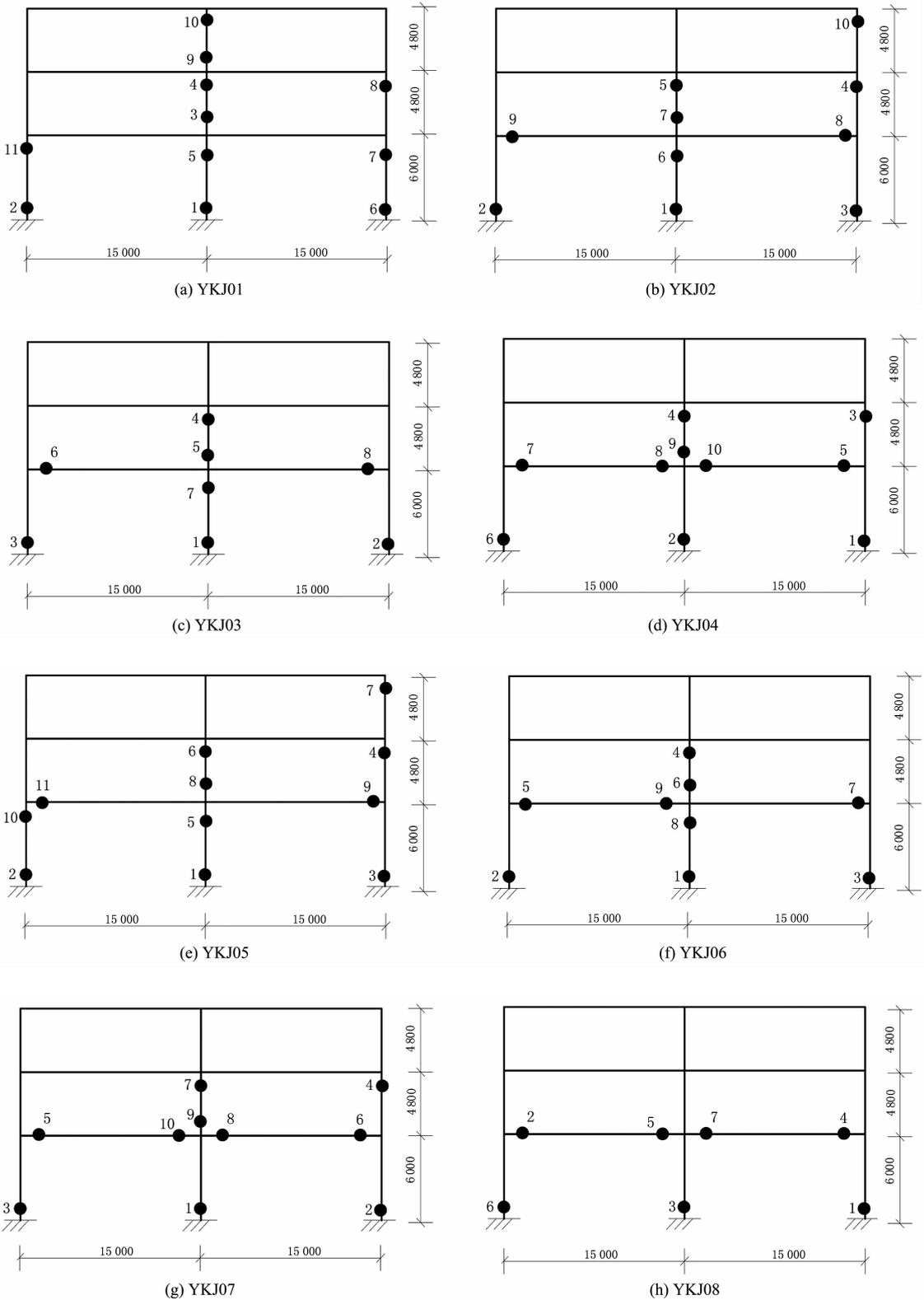


图 12 ImperialValley 罕遇地震作用下各框架塑性铰分布

Fig. 12 Plastic hinge distribution of YKJ01-YKJ08 for Imperial Valley rare earthquake

2)用 $\sum M_c = 1.0 \sum M_{bu}$ 确定柱配筋的 YKJ05 框架,其柱抗弯能力增强幅度接近按 $\sum M_c =$

$1.8 \sum M_b$ 确定柱配筋的 YKJ02 框架,从图中 YKJ02 和 YKJ05 框架的塑性铰分布情况可见,这

两榀框架塑性铰控制效果相近. 虽然仍有一系列柱端出现塑性铰, 但梁端也陆续出现塑性铰, 底层薄弱层现象已经消失, 而且推迟了柱端塑性铰出现的时间. 说明提高柱端弯矩增大系数, 在一定程度上改善了结构出铰机制, 但改善效果并未达到规范设计希望出现的梁铰破坏机制.

3) 按照梁端实际抗震受弯承载力调整柱端弯矩的方法, 以 $\sum M_c = \eta_c \sum M_{bua}$ 作为柱端设计依据时, 当柱端系数 η_c 达到 1.4 时, 结构在罕遇地震下除底层柱底外, 其他塑性铰出现在梁端, 属于较为理想的塑性铰破坏机制; 若采用 $\sum M_c = \eta_c \sum M_b$ 作为柱端弯矩设计依据, 则 η_c 达到 2.4 才能实现类似的塑性铰破坏机制, 此时中间层柱端仍出现部分塑性铰, 但该柱端转动较小. 在其他 3 条地震波作用下, 这两榀框架的总体反应与 Imperial Valley 波类似, 不再详述. 说明以梁端实际抗震受弯承载力调整柱端弯矩设计的 PC 框架, 柱端弯矩调整系数达到 1.4 时, 该框架在 4 条罕遇地震作用下均出现理想“梁铰机构”.

4) 对 8 榀框架在 4 条罕遇地震下分析发现, 底层柱底都会出现塑性铰, 说明底层柱底设计时有必要对该弯矩增大系数进一步提高.

4.2.4 $\sum M_b$ 与 $\sum M_{bua}$ 影响因素分析

$\sum M_b$ 与 $\sum M_{bua}$ 之间的差异主要由以下几方面造成: 1) 预应力梁端钢筋并不是由梁端抗震组合弯矩确定, 预应力筋由施工阶段及使用阶段裂缝宽度控制, 非预应力筋由规范规定预应力度控制, 导致所配钢筋面积高于按承载力计算截面配筋; 2) 材料设计值与材料标准值之间的差别; 3) 梁端实配钢筋与计算截面配筋之间的差别, 设计严格按 5% 考虑. 为了进一步说明 $\sum M_b$ 与 $\sum M_{bua}$ 之间的差异, 以 YKJ01 框架为例, 计算框架各节点处的 $\sum M_{bua} / \sum M_b$ 如表 7 所示.

表 7 YKJ01 各中间节点处的 $\sum M_{bua} / \sum M_b$

Tab. 7 The $\sum M_{bua} / \sum M_b$ of inter-story joints in YKJ01

节点类型	边界点		中节点	
	1 层	2 层	1 层	2 层
$\sum M_{bua} / \sum M_b$	1.426	1.471	1.811	1.978

$\sum M_{bua} / \sum M_b$ 直接揭示按 $\sum M_b$ 和按

$\sum M_{bua}$ 调整柱端弯矩的差异, 从表 7 中可以发现, 在边节点处, $\sum M_{bua} / \sum M_b$ 比值接近 1.5, 在中节点处, 该比值超过 1.8. 由于各层梁配筋相同, $\sum M_{bua}$ 值相同, 而不同楼层地震作用力不同, 上部楼层地震弯矩偏小, $\sum M_{bua} / \sum M_b$ 比值随着楼层上升而增大.

5 结 语

本文对按不同柱端弯矩调整方法设计的预应力混凝土框架进行非线性分析, 得到 PC 框架实现理想抗震性能的柱端弯矩调整系数取值. 结合静力弹塑性分析和非线性时程分析得出结论为:

1) 梁端实际抗弯承载力 $\sum M_{bua}$ 远高于梁端弯矩组合设计值 $\sum M_b$ 主要原因是, 设计时梁端预应力筋及普通钢筋按抗裂要求配置, 导致梁端钢筋超配, 提高了梁的抗弯能力.

2) 静力弹塑性分析和动力时程分析均表明, 参考 10 抗震规范设计 PC 框架, 在罕遇地震作用下, 底层柱两端均出现塑性铰, 为典型层间屈服机制, 结构抗震性能较差. 说明 10 抗震规范规定 η_c 取值 1.5 较小, 而 04 预应力规程是在 01 抗震规范基础上调整取值 1.4, 这两个取值均偏小, 有必要对 04 预应力规程重新修订并进一步提高该值.

3) 提高柱端弯矩增大系数后, 结构底层柱底出铰情况没有改善, 但梁端逐渐出铰, 结构屈服机制由“层间屈服机制”变为“混合屈服机制”, 表明提高柱端弯矩增大系数, 能够一定程度改善 PC 框架结构屈服破坏机制, 有利于结构形成规范期望出现的塑性铰耗能机制.

4) 通过本文分析发现, 对抗震等级为二级的预应力混凝土框架结构进行抗震设计时, 为了使结构实现“混合耗能机制”, 按照梁端组合弯矩值 $\sum M_b$ 进行调幅, 建议柱端弯矩增大系数取值高于 2.0.

5) 进行预应力混凝土框架结构“强柱弱梁”设计时, 本文可以按梁端实际抗震受弯承载力调整柱端弯矩的设计方法. 比如, 对抗震等级为二级的预应力混凝土框架结构, 柱端弯矩按梁端实际抗弯承载力方法进行调整时, 其调整系数取值 1.4. 对其它抗震等级的预应力混凝土框架结构, 我们将在后续进一步的研究工作中, 给出其合理取值范围.

参考文献

- [1] 马宏旺,陈晓宝. 钢筋混凝土框架结构强柱弱梁设计的概率分析[J]. 上海交通大学学报, 2005,39(5): 723-726.
MA Hongwang, CHEN Xiaobao. Probability analysis for strong Column-weak beam design of reinforced concrete frames [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(5): 723-726. (In Chinese)
- [2] EC8. Design of structures for earthquake resistance-part1: general rules, seismic actions and rules for buildings[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005:170-187.
- [3] ACI-318. Building code requirement for structural concrete and commentary[S]. California: American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 2002:377-383.
- [4] NZS 3101: Part 1-the design of concrete structures, Part 2-commentary on the design of concrete structures[S]. Wellington: Standard Council, 1995:273-285.
- [5] CSA-A23.3-04. Design of concrete structures[S]. Mississauga: Canadian Standard Association, 2004:125-151.
- [6] GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001:48-49.
GB50011-2001 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001:48-49. (In Chinese)
- [7] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010:54-55.
GB50011-2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010:54-55. (In Chinese)
- [8] JGJ140-2004 预应力混凝土结构抗震设计规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004:17-18.
JGJ140-2004 Seismic design procedures for prestressed concrete structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 17-18. (In Chinese)
- [9] 周靖. 钢筋混凝土框架结构基于性能系数抗震设计法的基础研究[D]. 广州:华南理工大学土木与交通学院, 2006:61-66.
ZHOU Jing. Basic research of behavior factor based seismic design method of RC frame structure [D]. Guangzhou: School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 2006:61-66. (In Chinese)
- [10] 叶列平,马千里,缪志伟. 钢筋混凝土框架结构强柱弱梁设计方法的研究[J]. 工程力学, 2010,27(12): 102-113.
YE Lieping, MA Qianli, MIAO Zhiwei. Study on weak beam-strong column design method of RC frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2010,27(12): 102-113. (In Chinese)
- [11] 张瀑,鲁兆红,淡浩. 预应力混凝土框架结构实用设计方法[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012:60-71.
ZHANG Pu, LU Zhaohong, DAN Hao. The practical design method of prestressed concrete frame structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 60-71. (In Chinese)
- [12] 吕志涛,孟少平. 预应力混凝土框架设计的几个问题[J]. 建筑结构学报, 1997,18(3): 74-77.
LV Zhitao, MENG Shaoping. Problems of prestressed concrete frame design[J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(3):74-77. (In Chinese)
- [13] 孟少平. 预应力混凝土框架结构抗震能力及设计方法的研究[D]. 南京:东南大学土木工程学院, 2000.
MENG Shaoping. Study on seismic capacity and design approach of prestressed concrete frame structures [D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2000. (In Chinese)
- [14] DOOLEY K L, BRACCI J M. Seismic evaluation of column-to-beam strength ratios in reinforced concrete frames[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(6):843-851.
- [15] 王鑫. 既有预应力混凝土框架结构抗震能力评估及相关问题研究[D]. 南京:东南大学土木工程学院, 2010:11-20.
WANG Xin. Research on seismic capacity evaluation of existing prestressed concrete frame structure and relevant issues [D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2010:11-20. (In Chinese)
- [16] 张耀庭,卢怡思,杜晓菊,等. 柱端弯矩增大系数对PC框架结构抗震性能影响的研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2014,41(11): 37-47.
ZHANG Yaoting, LU Yisi, DU Xiaojie, et al. Study on the effects of moment magnifying coefficients at column ends on the seismic capacity of prestressed concrete frame [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(11): 37-47. (In Chinese)
- [17] 蔡健,周靖,方小丹. 柱端弯矩增大系数取值对RC框架结构抗震性能影响的评估[J]. 土木工程学报, 2007, 40(1): 6-14.
CAI Jian, ZHOU Jing, FANG Xiaodan. Evaluation of influences of various moment magnifying coefficients at column ends of RC frames on seismic performance[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(1):6-14. (In Chinese)
- [18] MAZZONI S, MCKENNA F, MICHAEL H S, et al. OpenSees command language manual[M]. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 2006.
- [19] CHOPRA A K, GOEL R K. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 561-582.
- [20] 吕大刚,崔双双,陈志恒. 基于Pushover分析的钢筋混凝土框架结构抗侧向倒塌能力评定[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 180-189.
LV Dagang, CUI Shuangshuang, CHEN Zhiheng. Assessment of sides way collapse resistant capacity of reinforced concrete frame structures based on pushover analysis[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1):180-189. (In Chinese)
- [21] GASPARINI D A, VANMARCKE E H J. Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra [R]. Boston: Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1976:56-61.