DOI:10.16468/j.issn.1004-0366.2006.03.028
第18卷 第3期 甘肃科学学报 Vol.18 No.3
2006年9月 Journal of Gansu Sciences Sep.2006

基于 Push-Over 方法的纯钢框架弹塑性分析

王秀丽[1]，陈祥勇[1,2]，秦雪映[1]
(1.兰州理工大学 土木工程学院，甘肃 兰州 730050； 2.中冶华天工程技术有限公司，安徽 马鞍山 243005)

摘 要： 应用 Push-Over 方法的 2 种荷载形式，对一个纯钢框架结构体系在地震作用下的弹塑性性能进行了分析.通过对其变形性能和塑性铰规律的研究，得到纯钢框架体系的抗震性能，还通过对其塑性铰发生位置和发生顺序规律的研究，得出纯钢框架结构的薄弱层和最不利位置，为纯钢框架结构体系的优化设计提供了理论基础和前提条件，同时也有利于纯钢框架结构体系在抗震设防地区的推广.

关键词： 纯钢框架；push-over；塑性铰；弹塑性
中图分类号： TU313，TU391 **文献标识码：** A **文章编号：** 1004-0366(2006)03-0101-05

An Elasto-Plastic Analysis of Pure Steel Frame Based on the Push-Over Method

WANG Xiu-li[1]，CHEN Xiang-yong[1,2]，Qin Xue-ying[1]
(1.*School of Civil Engineering，Lanzhou University of Science and Technology，Lanzhou* 730050，*China*；
2.*Huatian Technology Engineering Company Ltd，China Metallargy，Maanshan* 243005，*China*)

Abstract： The elastoplastic performances of a pure steel frame are studied by two load patterns of push-over method，and the structure's anti-seismic performances in the deformation properties and law of the plastic hinge are known. In the meantime，the weakest layer and the most unfavorable position of the pure steel frame are finally found，thus providing a theoretical basis and the prereguisite for the optimal design of the frame. It can help popularize this structural form in seismic areas.

Key words： pure steel frame；push-over；plastic hinge；elastoplastic performances

多层轻型钢结构住宅中最常用的结构体系为纯钢框架结构.它具有下列优势：①是一种延性体系；②在建筑设计和平面布置上具有很大的灵活性；③各部分刚度比较均匀，构造简单，易于施工；④自振周期较长，自重较轻，对地震作用不敏感.就结构抗震的角度来说，纯钢框架体系作为一种具有良好的抗震性能的结构体系，相对于其他结构形式来说，它的自重轻，因而在地震作用下所受的地震作用较小.另外，由于钢结构属于柔性结构，所以它的抗震性能优于其他的结构形式，能有效地降低地震响应及灾害影响程度[1~3].我国是一个多地震区国家，在地震区建筑中多多推广应用此种结构，必可大大减少地震灾害和人员伤亡.

关于纯钢框架的弹塑性性能已经有很多研究者做了大量的研究，其在地震作用下的受力与变形已经研究的较为透彻[4~7].但是纯钢框架结构体系在地震作用下是如何破坏的，以及结构的薄弱层及不利位置如何确定仍是一个尚需解决的问题，只有充分了解这些机理才能有效的在设计时对薄弱层和不利位置进行加强，才能在广大的抗震设防区进行推广这种结构体系，减小地震带来的损失.我们正是以此着手，以一个正在建设的地震区的纯钢框架为例，通过对它在地震作用下的弹塑性性能分析，研究纯钢框架的塑性性能以及结构在地震作用下的薄弱层及不利位置，优化纯钢框架体系的设计，以便大力推广这种结构体系.

收稿日期： 2005－10－28
基金项目： 甘肃省建设科技攻关项目(JK-200302)；兰州理工大学优秀青年教师科研资助计划

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 工程概况

该工程为甘肃省多层钢结构试点工程，建筑主体高度22.4 m，建筑平面为3叉形，总建筑面积约6 756 m^2. 该地区抗震设防烈度为7度，Ⅱ类场地，建筑结构安全等级为2级. 基本风压0.3 kN/m^2，地面粗糙度类别为B类，基本雪压为0.1 kN/m^2. 结构设计使用年限为50年. 结构采用纯钢框架体系，平面布置如图1所示. 结构的梁全部采用H型钢框架，柱部采用H型钢和钢管混凝土柱，2种型式在连梁较多或存在非正交方向梁柱连接的地方均采用钢管柱形式，以解决H型钢梁柱连接受限的问题，构件型号如表1所示.

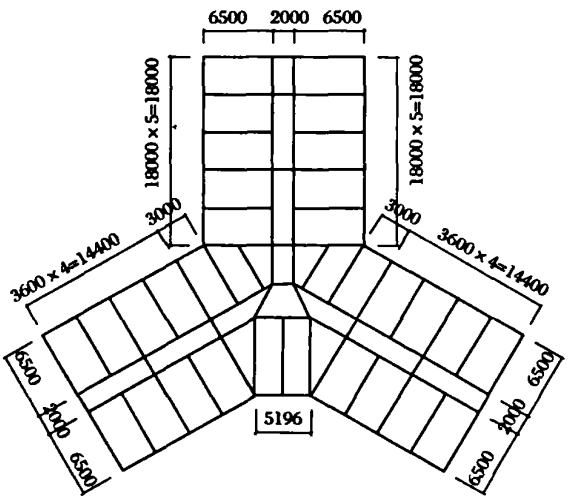


图1 工程结构平面

表1 构件型号

编号	框架梁		框架柱	
	L^1	L^2	ZH^1	ZH^2
型号	396X199X7X11	350X175X7X11	390X300X10X16	φ450X10

注：工程采用Q^{345}钢

工程设计次梁与主梁采用铰接的做法，并与楼板形成简支组合梁，以提高梁的承载力，减小了梁的高度.

2 弹塑性分析

采用ansys有限元分析软件对该纯钢框架进行整体分析，并应用了Push-Over分析方法.

2.1 基本假定

为了达到实用简化的目的，采用了如下假定：

①结构到达给定位移极限或结构按耗能机制破坏之前，出现的截面塑性铰有足够的转动能力不发生局部破坏；

②耗能机制形成前的结构不会发生失稳、剪切破坏；

③在2次出现塑性铰的中间阶段，所有水平荷载按同一比例增加，即满足单向加载条件；

④不考虑底部剪力－顶点位移曲线下降段的负刚度；

⑤杆件的塑性变形仅发生在杆件两端的局部区域，塑性铰只在杆端出现；

⑥杆件剪切变形影响忽略不计，且不考虑塑性铰处的卸载现象；

⑦杆件出现局部屈曲和出平面屈曲均被有效地防止；

⑧不考虑由于平移与扭转耦联、结构扭转使竖向荷载的合力与抗侧力构件的轴线产生偏心而引起的扭转.

2.2 分析方法

近年来，介于弹性分析与弹塑性动力分析之间的弹塑性静力分析Push-Over方法是一种在国内外得到广泛应用的对结构抗震能力进行评估的方法，其应用范围主要集中于对现有结构、设计方案进行抗侧力能力的计算，从而估算其抗震能力. 弹塑性静力Push-Over分析是在结构上施加竖向荷载并保持不变，同时施加某种分布形式的水平荷载或位移，随着水平荷载或位移的不断增加，构件逐渐屈服进入塑性状态，从而得到结构在横向静力作用下的弹塑性性能.

Push-Over方法比非线性时程分析方法简单易行、计算量小，它不仅能够很好地反映结构的整体变形，还能够很清晰地反映结构局部的塑性变形机制、局部楼层变形过大、强度不均匀和局部过载等问题. 我国新的抗震设计规范将Push-Over分析方法作为大震下结构弹塑性变形分析的一种方法. 又因为是分析一个低层纯钢框架结构，因此Push-Over方法为最佳的分析方法[8~10].

选择合理的加载模式是Push-Over分析方法中的一个关键. 加载模式应当能较合理地反映地震作用时结构各层、各节点实际承受的惯性力分布，又使所求位移能大体上反映地震作用下结构的位移状况. 我们针对实际工程的结构形式采用2种水平荷载加载方式：

均匀加载模式：地震对各个楼层的作用力与该楼层的重量成比例，可表示为

$$F_i=[w_i/\sum_{m=1}^{n}w_m]V_b.$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

倒三角加载模式:这种加载模式广泛用于各国规范,可表示为

$$F_i=[w_ih_i/\sum_{m=1}^{n}w_mh_m]V_b.$$

在实际操作中,首先确定初始分布荷载方式、数值,然后乘以一系数 k,逐渐增加 k 的值直到达到预期的效应,然后再调整结构的刚度矩阵,重新加载,再增加 k 的值,如此循环直至结构破坏或达到目标值.由于在第 1 种加载模式结构展现的变形和塑性性能都优于第 2 种加载模式,且第 2 种加载模式较为接近实际的地震荷载,故下面的分析以第 2 种加载模式为主,第 1 种加载模式产生的效果只作为辅助分析,限于篇幅,不再罗列第 1 种加载模式下的各种效应.

2.3　加载方向的确定

水平荷载的大小确定后,如何确定水平荷载的加载方向也是非常重要的.由于此工程为一学校学生宿舍楼,层数为 7 层,且沿结构高度方向结构的刚度无突变,故结构的振动以第一振形为主.通过对结构进行模态分析可知结构的第一振形如图 2 所示,结构的第一振形为 X 方向的变化,故只需对结构的 X 方向施加荷载进行计算即可.

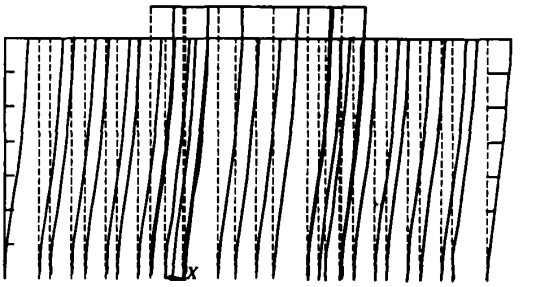
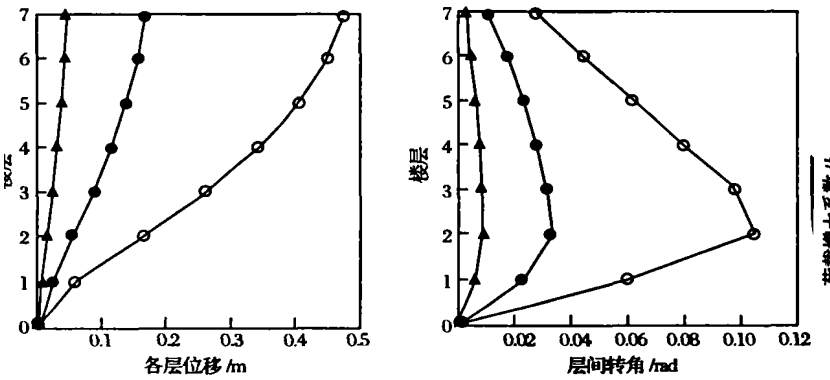


图 2　结构第一阶振形

3　结果分析

3.1　结构塑性变形能力分析

结构塑性性能分析,主要以结构的变形能力为主要指标.此工程的结构体系在 2 种分布荷载的作用下具有良好的变形特点,体现了较好的塑性性能.如下图所示,图 3(a) 表示结构在受力过程中 3 种状态下沿高度位移变化曲线,(b) 表示结构在受力过程中 3 种状态下的层间转角变化曲线.图 4 表示结构 Push-Over 分析全过程中的顶点位移和荷载增大系数 k 的关系曲线.



(a) 沿高度的位移变化曲线　　(b) 层间位移角曲线

图 3　结构受力过程中的 3 种状态

▲ 初始水平力时　● 第一个塑性铰时　○ 达到目标位移时

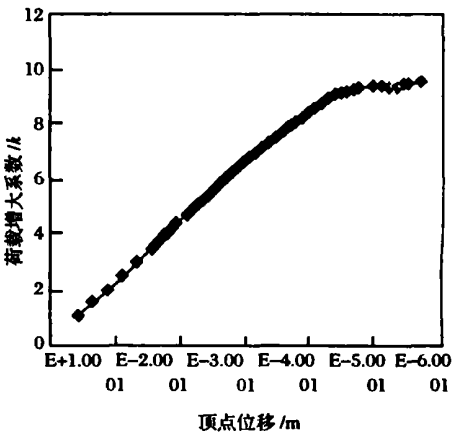


图 4　顶点位移和加载系数 k 的关系

图 3 中曲线"▲"是初始水平力时结构的位移曲线,曲线"●"是结构出现第一个塑性铰时结构的位移曲线,曲线"○"是结构达到规定的目标层间转角时结构的位移曲线.通过图形可以得出曲线"●"的值平均是曲线"▲"值的 3.68 倍左右,而曲线"○"的值则平均是曲线"▲"值的 12 倍左右.而初始水平荷载的值是按照 7 度抗震设防,用底部剪力法算得的水平荷载的值,由此可见所采用的纯钢框架体系具有良好的变形性能.

由图 4 的曲线关系可以看出结构在地震作用下具有良好的延性,结构在出现大量的塑性铰后仍然能保持近乎弹性变形的状态,体现了结构自身在地震时能够很好的吸收地震能量.通过以上分析可见,纯钢框架体系由着良好的抗震性能,是一种适用于抗震设防地区的新型结构体系.

3.2　结构塑性铰的发生规律

通过对结构的 Push-Over 加载分析,得到了结构达到目标位移时,产生的所有塑性铰,其位置和顺

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

序如图5和表2所示.通过对塑性铰的分析表明,结构的第2层出现的塑性铰最多,编号表示塑性铰的发生顺序.通过对图3(b)的分析可知,第2层也就是层间转角位移最大的位置,由此可知第2层为结构的薄弱层,这和图5所表示塑性铰的结果是相一致的.

为了方便分析,把所有产生塑性铰的顺序按照列表的方式表示出来(见表2).

表2 塑性铰的产生顺序

楼层	塑性铰编号																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1	2	3	4	5	7	6	8	9	10	11	12	14	13	15	16	17	18	19
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
4	1	2	3	4	5	8	6	7	9	10	11	12	13	14	—	—	—	—	—
5	1	2	3	4	5	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

楼层	塑性铰编号																		
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	20
1	24	20	21	25	27	26	—	22	23	29	28	—	31	—	—	30	—	—	24
2	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	20
3	23	20	21	—	—	22	—	24	25	26	27	—	—	29	—	28	30	31	23
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注:①由于第37个塑性铰到第53个塑性铰只有第2层有,别的楼层均没有发生,故不予列出;②"—"表示在该层该位置没有发生塑性铰;③表2所编的塑性铰号均以第2层所产生的顺序为参照,也即图5所示的顺序和位置.

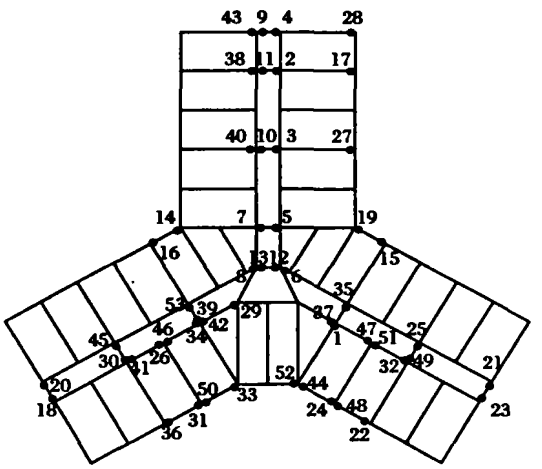


图5 第2层塑性铰位置和顺序

通过对纯钢框架结构体系在地震作用下达到目标位移时产生塑性铰的研究,可以得到如下规律:

(1) 塑性铰纵向发生规律 即研究不同楼层的塑性铰发生规律,可总结为:

①连接同一根柱子的不同楼层的同一位置的梁端来说,塑性铰总是最先发生在第2层,然后按照下面2种方式展开:塑性铰先在第2层发生,然后在第一层出现塑性铰,接着发展到第3层、第4层.此种塑性铰发生方式占所有塑性铰的85%左右.特别是在前22个塑性铰中,基本上是严格遵守这个规律的.塑性铰先发生在第2层,然后出现在第3层,接着发生在第一层,然后按照第4、第5层的顺序发展.这种发生顺序主要都是发生在第22个以后的塑性铰中.在所有产生的塑性铰中,没有一个是先发生在第2层以外的楼层的,也没有一个在第2层以外的楼层单独出现的.分析第2种方式的出现主要是因为第2层塑性铰的出现使该铰周围的应力进行了重分布,从而破坏了原来的规律.

②所有的塑性铰均发生在梁上,没有一个柱铰发生.由于本工程是完全按照抗震规范进行设计的,故满足抗震设防的"强柱弱梁"要求.

③发生塑性铰最多的楼层是第2层,然后是第1层、第3层、第4层,到第5层的时候塑性铰的个数就较少了,第6和第7层就已经没有一个塑性铰产生了.

(2) 塑性铰横向发生规律 即研究同一楼层的塑性铰发生规律,可总结为:

①各层间发生的塑性铰的顺序和位置保持着一致性.以第2层为基准层,在其他各层发生塑性铰的顺序基本上都是按照第2层的顺序发展的,只有少数几个塑性铰例外,这点可由表2看出.

②塑性铰出现的部位:如果将结构人为的分成A、B、C、D、E、F 6个部分(如图6所示),通过和图5的塑性铰位置比较可知,连接这6个部分的连梁两端全部出现塑性铰;另外一个塑性铰较集中的区域

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

是承担次梁荷载的梁间.此处主要是由于次梁采用铰接,在此类主梁间产生较大的集中荷载,从而导致大量的塑性铰出现.

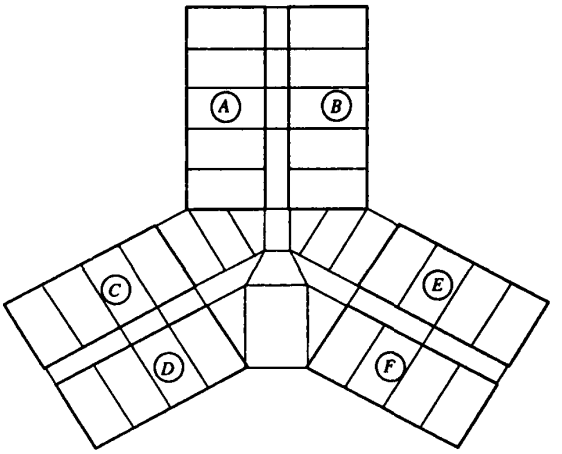


图 6　结构分块

由图 6 可知,塑性铰沿结构的中轴方向基本上呈对称趋势,特别是在 C、D、E、F 这些区域最为明显.

从施加荷载的方向看,产生塑性铰的梁于施加荷载的方向存在着一致性,和荷载方向一致或接近的梁,均较别的梁易产生塑性铰.

4　结论

(1) 通过对上述结构的分析,可以得到纯钢框架结构体系的一些塑性特征:

①纯钢框架是一种塑性变形能力非常强的结构体系.

②纯钢框架结构体系在地震作用下的存在一个薄弱层.纯钢框架的破坏总是从这一层开始的,结构的最不利位置也就在这一层上,结构体系的其他薄弱层出现的塑性铰的个数均以此层为中心向上下 2 个方向递减.

③纯钢框架结构体系在地震作用下,塑性铰在各层的发生基本上都是按照相同的顺序进行,这说明结构每一层不利位置的顺序是相同的.

④纯钢框架结构在地震作用下的不利位置主要集中于结构体系的联系梁端以及存在集中荷载的梁上.

⑤和水平荷载方向一致或接近的梁的梁端也是纯钢框架结构体系在地震作用下的不利位置.这也反映了纯钢框架结构体系良好的传力能力.

⑥纯钢框架结构体系符合抗震设计要求的"强柱弱梁"理念,在地震作用下,能呈现"梁铰机制",使梁端首先出现塑性铰,避免柱端先出现塑性铰,使整个框架在地震作用下,具有良好的变形能力.

(2) 通过对结构塑性性能的研究,表明纯钢框架体系有着良好的塑性性能,符合在抗震区广泛推广的要求;通过对塑性铰的研究可以得到,纯钢框架体系在地震作用下的破坏总是最先发生在薄弱层的最不利位置,在设计时应对这些部位进行加强设计,如该工程的第 2 层,而对于像工程的第 5、第 6 层,基本上不出现或塑性铰出现较少的楼层,可以适当的进行优化设计,以节省造价,以使其能更广泛的应用于广大的抗震地区特别是西部等欠发达地区.

参考文献:

[1] 王秀丽,殷占忠,李庆福.新型钢框架梁柱 T 型节点抗震性能试验研究[J].甘肃科学学报,2004,16(4):90-94.

[2] 刘振奎,李从林,余云燕.结构优化分析的实用算法[J].甘肃科学学报,2000,12(1):43-47.

[3] 刘歌青,石永久,王元清,等.纯框架体系在多层轻钢住宅中的应用研究[J].工业建筑,2002,32(12):64-66.

[4] 李国强,刘玉姝.钢结构框架体系整体非线性分析研究综述[J].同济大学学报,2003,31(2):138-144.

[5] 丁洁民,沈祖炎.空间钢框架结构的弹塑性稳定[J].建筑结构学报,1993,14(6):42-51.

[6] 杨志勇,何若全.高层钢结构弹塑性抗震分析静动力法[J].建筑结构学报,2003,24(3):25-32.

[7] 熊向阳,戚震华.侧向荷载分布方式对静力弹塑性分析结果的影响[J].建筑科学,2001,17(5):8-13.

[8] 杨溥,李英明,王亚勇,等.结构静力弹塑性分析(push-over)方法的改进[J].建筑结构学报,2000,21(1):44-51.

[9] Peter Fajfar. Simple Push-over Analysis of Buildings Structures[M]. 11th World Conference on Earthquake Engineering, 1996.

[10] 聂建国,秦凯,肖岩.方钢管混凝土框架结构的 push-over 分析[J].工业建筑,2005,35(3):68-70.

作者简介:

王秀丽,(1963-)女,辽宁省沈阳人,2004 年哈尔滨工业大学结构工程专业博士毕业,现任兰州理工大学土木工程学院教授,博士生导师,空间结构研究所所长,主要研究方向为空间结构与钢结构.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net