

文章编号: 1007 - 6069(2013) 01 - 0080 - 07

## 某 6 层钢框架加层房屋动静力学性能探讨

褚云朋<sup>1,2</sup>, 姚 勇<sup>1</sup>, 杨亚龙<sup>1</sup>, 王秀丽<sup>2</sup>

(1、西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2、兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 因房屋功能要求增加, 对某六层钢框架房屋采用轻刚门架进行加层改造, 经验算, 基础及原结构不需进行加固, 满足相关设计规范要求。利用有限元软件 ETABS 对上部主体结构进行了动静力学特性分析, 探讨了加层前后静荷载下的承载力、变形, 地震作用下结构自振频率、振型、层间位移角、加速度和破坏模式等性能变化, 通过加设支撑改善结构刚度分布和动力特性, 减小地震作用, 使之满足相关设计规范要求, 为类似加层改造工程提供设计参考。

**关键词:** 轻钢加层; 地震作用; 动力特性分析; 支撑优化设计; 破坏模式

中图分类号: TU393. 2

文献标志码: A

### Discussion on static and dynamic mechanical properties of a six-story steel frame building with added story

CHU Yunpeng<sup>1,2</sup>, YAO Yong<sup>1</sup>, YANG Yalong<sup>1</sup>, WANG Xiuli<sup>2</sup>

(( 1. College of Civil engineering, Southwest University of Technology, Mianyang 621010, China;

2. School of civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China )

**Abstract:** In the story-adding transformation design of a six-story steel frame by added-story of light-weight portal frame for the increased functional requirements, it is found out that the foundation and original structure can be used and meet the design specification requirements without strengthening. This paper analyzes the static and dynamic characteristics of its upper main structure by the software ETABS, explores the bearing capacity, deformation under static load before and after story-adding transformation and the changes of natural frequency, vibration mode, inter-story drift angle, acceleration and the failure mode of the structures under earthquake. By added support it is possible to improve the structural stiffness distribution and dynamic characteristics, reduce the seismic action, make it meet the design specifications. The paper provides a reference to similar story-adding transformation project.

**Key words:** added story by lightweight steel; earthquake action; dynamic characteristic analysis; the optimal design of the support; failure mode

## 引言

随着城市化及新农村建设进程加快, 大量旧房屋已不能满足生产及生活需求, 需进行加层改造设计, 其中以 RC 结构居多, 近两年, 也有钢框架结构加层改造的现象。有些房屋使用时间较短, 拆除新建花费投入资金较多, 建造时间较长, 且会产生大量的建筑固体废弃物, 对环境造成较大污染, 所以有相当数量的房屋可

收稿日期: 2012 - 11 - 17; 修订日期: 2013 - 01 - 21

基金项目: 四川省科技支撑计划(2011GZ0043); 四川省教育厅项目(12ZB157)

作者简介: 褚云朋(1979 -), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事工程抗震研究. E-mail: chuyunpeng@swust.edu.cn

以通过加层改造来解决这些问题,加层改造费用约为新建建筑的 30% 及以下,经济环保。原结构在设计时,由于考虑了经济因素,所以本结构设计的相关指标富余量有限。轻钢结构自重轻,采用轻钢结构进行加层,易满足相关规范设计要求,且其具有节点连接简单,施工安装速度快,是加层改建的最好选择<sup>[1]</sup>。但轻钢加层改变了原结构刚度分布及静力承载性能,动荷载作用下,结构的层间位移、顶层加速度、振型及结构破坏模式等都会有改变。

分析加层改造前后结构的动力特性,针对力学性能之不足,通过在薄弱部位或者薄弱之处加设支撑方法加以解决,并进行支撑布置位置,支撑截面型式,截面参数进行优化设计,为类似工程的加层改造工程提供参考。

### 1 工程概况

某企业办公楼为 6 层钢框架结构,如图 1 所示,基础为钢筋混凝土柱下独立基础,上部是钢框架结构,底层层高 3.6m,其余层高 3.3m,楼板采用混凝土现浇楼板,其中混凝土强度为 C25,板厚 100mm,室内地面至 1.2m 之间墙体采用普通烧结粘土砖墙,1.2m 以上墙体采用蒸压轻质混凝土板(ALC 板),目前使用情况良好。该办公楼位于抗震设防烈度为 7 度(0.15g)的设防区,场地类别为 II 类,由于原建筑物未设大型会议室,需要在原有结构上直接加建一层作为大型会议室使用。鉴于轻钢结构良好抗震性能和可实现快速安装,采用轻型门式刚架对原结构进行加层改造设计,刚架檐口层高为 3.9m,柱距 6m,跨度为 12m。屋面坡度 0.1,增设屋面采用夹芯彩钢组合屋面板,外墙采用压型彩钢板组合墙体,墙架构架采用内嵌式与梁柱连接,便于外立面的平整性,两端山墙中部有一根柱延伸为抗风柱,见图 2。

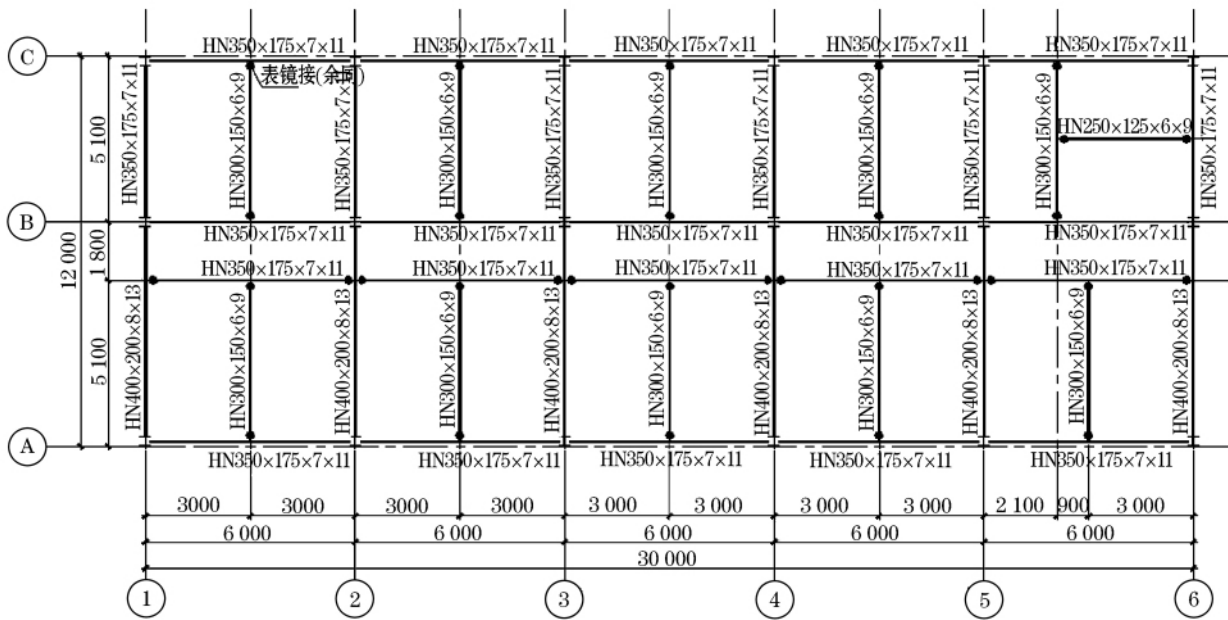


图 1 原结构平面布置图

Fig. 1 Plan of original structure

### 2 加层改造方案

根据现场检测鉴定报告,基础未发生不均匀沉降,原结构基础、板的混凝土强度等级高于原图纸设计要求,梁柱钢材未发生锈蚀,钢材强度满足原设计强度要求;经验算结构加层后基础和柱梁承载力都能满足要求,该结构可以不对基础进行加固,原结构柱与新增柱连接处采用腋板与外贴钢板法进行补强加固,该种加固方法已在江油市的某工程加层改造中应用过,通过有限元软件 ANSYS10.0 分析计算,该节点承载力及刚度均较大,且满足欧洲规范 EC3 中刚接节点的要求,可保证加层连接节点满足强节点弱杆件的抗震设计原则。拟在新增轻型门式刚架两边跨设置水平支撑和柱间支撑,通过改变支撑截面

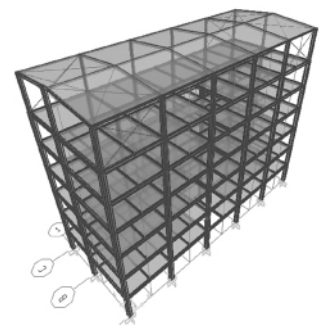


图 2 加层后模型

Fig. 2 Model of story-added structure

和布置位置的优化设计比较,最终确定加设支撑的方案。

### 3 结构静力特性分析

#### 3.1 模型信息

采用房屋分析与设计软件 ETABS 对原结构及加层结构进行整体建模分析。楼板采用 shell 单元模拟,并设定板平面内刚度无限大;梁、柱采用 frame 单元模拟,墙体转化为线荷载直接作用于梁间<sup>[2]</sup>。原结构柱截面为 HW400×400×21×21,纵向梁(除厕所间的纵向次梁 HN250×125×6×9)均采用 HN350×175×7×11,横向次梁采用 HN300×150×6.5×9,A、B 轴线间横向主梁为 HN400×200×8×13,B、C 轴线间横向主梁为 HN350×175×7×11,加层门式刚架柱为 HW300×300×10×15,斜梁为 HN250×125×6×9,屋檐、屋脊的刚性系杆采用  $\phi 108 \times 3$ ,水平支撑和柱间支撑用 HN100×50×5×7。除系杆和支撑外所有构件均采用 Q345B 结构钢,系杆和支撑采用 Q235B 结构钢。

#### 3.2 加固前后结构内力与变形

荷载按实际使用情况和《建筑结构荷载规范》<sup>[3]</sup>中相关规定取值:楼板自重软件已考虑,楼面恒载取  $2\text{kN/m}^2$ ,楼面活载取  $0.5\text{kN/m}^2$ ,屋面恒载取  $3\text{kN/m}^2$ ,屋面(不上人)活载取  $0.5\text{kN/m}^2$ 。建筑场地类别为 II 类,设计地震分组为第二组,抗震设防烈度为 7 度(0.15g),结构抗震等级为二级,结构总高小于 50m,根据《建筑抗震设计规范》<sup>[4]</sup>结构阻尼比取 0.04。

表 1 加层前后各层柱最大轴力及最大压缩变形量

Table 1 Maximum axial forces and maximum compressive deformations of columns in each story before and after adding story

类别	柱最大轴力/kN							最大竖向变形量/mm		
	1	2	3	4	5	6	7	纵向	横向	竖向
加层前	2 059.4	1 687.9	1 320.4	955.4	592.1	242.7	--	1.019	8.097	5.990
加层后	2 905.6	2 400.3	1 900.3	1 403.9	910.0	419.5	51.74	1.366	11.177	6.306

结构加层改造前后,在恒载和活载控制组合中,各层柱最大轴力及最大竖向变形量如表 1 所示。从表 1 中可以得到,加层改造对于原结构柱的内力影响较大,加建的第 7 层使底层柱最大轴力增大了 41%,对构件承载力影响较大。所以,加层改造工程中必须对竖向承力构件的承载力进行校核。本工程中底层柱稳定承载力为  $7\,502.9\text{kN} > 2\,905.6\text{kN}$ ,满足承载力要求。而对于竖向变形,由于稳定承载力远远高于外荷载产生的最大轴力,所以结构加层前后最大竖向变形量变化不大。故对于加层改造工程,结构静力特性分析应着重于承载力验算,承载力条件满足时变形条件一般都满足要求。

### 4 结构动力特性分析

结构动力特性分析主要对结构进行了模态、反应谱和时程分析,讨论加层对结构频率、振型、层间位移和加速度的影响。

#### 4.1 频率及振型

对原结构分别采用 PKPM 和 ETABS 建模,对加层后结构采用 ETABS 建模,对各个模型进行模态分析,列出前 5 阶模态的周期和振型如表 2 所示。

从表 2 可知,对于原结构 PKPM 和 ETABS 计算结果基本相同,表明采用 ETABS 软件建模分析原结构,及其加层可靠性分析可行,后续加层模型分析可信。对比加层前后结果可知,加层改造对结构周期影响较大,而结构低阶振型影响较小,高阶振型影响较大。轻钢门式刚架加层后整体结构刚度减小,周期变大,因此必须对加层后结构整体动力特性进行分析、验算,看其是否满足相关设计规范要求。

表 2 周期和振型  
Table 2 Period and mode shape

阶数	PKPM(原结构)		ETABS(原结构)		ETABS(加层后结构)	
	周期/s	振型	周期/s	振型	周期/s	振型
1	1.659 3	X 方向平动	1.642 6	X 方向平动	1.684 3	X 方向平动
2	1.427 7	Y 方向平动	1.389 6	Y 方向平动	1.430 5	Y 方向平动
3	1.288 4	扭转	1.289 4	扭转	1.329 4	扭转
4	0.519 2	高阶 X 方向平动	0.519 1	高阶 X 方向平动	0.534 6	高阶局部
5	0.417 3	高阶 Y 方向平动	0.415 2	高阶 Y 方向平动	0.531 9	高阶局部

### 4.2 层间位移

轻钢结构自重轻, 在地震作用下, 主要考虑因素是层间位移<sup>[5]</sup>。轻钢加层结构层间位移直接影响加层工程能否完成, 宜通过控制结构层间位移的方法来进行加层结构设计<sup>[6]</sup>。对加层前后整体结构 X、Y 方向进行 7 度多遇地震作用下的振型分解反应谱分析, 得到两个方向的层间位移角如图 3 所示。

由图 3(a) 可知 X 方向加层前后各层层间位移基本相同, 最大值都出现在第 2 层, 只在第 5 层有明显变化, 但都小于规范<sup>[4]</sup>要求的 1/250。说明 X 方向, 轻钢门式刚架加层后结构刚度分布均匀, 能够抵抗增加的层间剪力, 保证结构变形满足要求。由图 3(b) 可知, Y 方向加层前后, 原有楼层的层间位移角变化较小, 且小于规范<sup>[4]</sup>要求的 1/250, 但加层与原结构之间有较大的层间位移突变, 表明加层结构在 Y 方向刚度与下层差异较大, 需加设支撑进行处置。

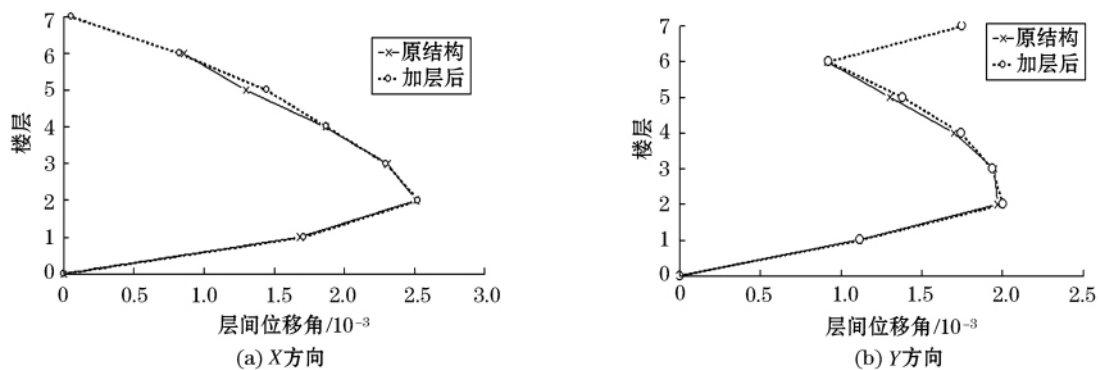


图 3 楼层层间位移角

Fig. 3 Interstory drift angle of each story

### 4.3 支撑参数

由反应谱分析得到的层间位移可知, 初始加层改造方案中加层部分的 Y 方向刚度较小。工程中常采取设置支撑的方式增加结构刚度, 框架-支撑结构中有中心支撑和偏心支撑, 而在相同用钢量前提下, 十字形支撑和人字形支撑作用最为显著, 在设计多遇地震下易满足满足规范中框架结构侧移限值的要求<sup>[7]</sup>。再考虑到施工难易程度, 本工程采用中心十字形交叉支撑, 在不改变支撑形式前提下, 通过支撑不同截面形式和布置位置来讨论对加层刚度影响。

#### 4.3.1 支撑截面形式

常见的支撑截面有 H 型钢、角钢和圆钢, 用圆钢要求控制支撑构件与主结构要紧密结合, 且刚度增加不大。本工程初始方案采用的是 HN100 × 50 × 5 × 7, 支撑截面分别为 L40 × 5 和 2 L20 × 3, 分析截面改变后对结构层间刚度影响如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 在满足承载力要求前提下, 在初始位置上改变支撑截面形式对 X、Y 方向刚度影响不大。再考虑到施工难易程度, 本工程最终采用 L40 × 5 的十字形拼接截面。

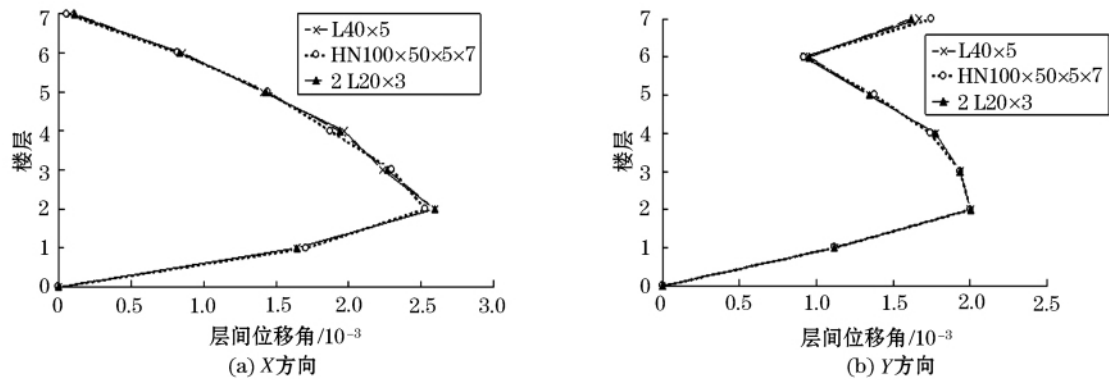


图4 楼层层间位移角

Fig. 4 Interstory drift angle of each story

#### 4.3.2 支撑布置

支撑布置位置直接影响到结构刚度分布,从而影响内力分布,在增加楼层强度和刚度的同时应尽量减少地震作用的增大<sup>[8]</sup>。初始方案中,柱间支撑和屋面水平支撑都布置在结构端部第1开间。改变支撑位置设置到端部第2开间,得出两种不同布置位置下层间位移角变化如图5所示。

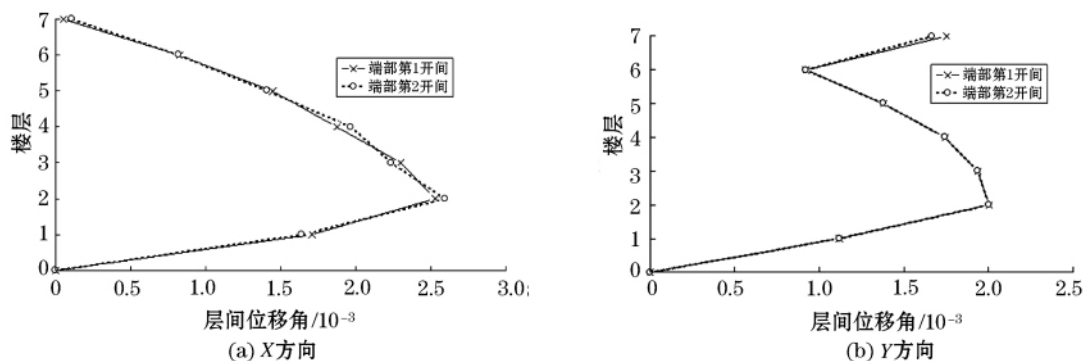
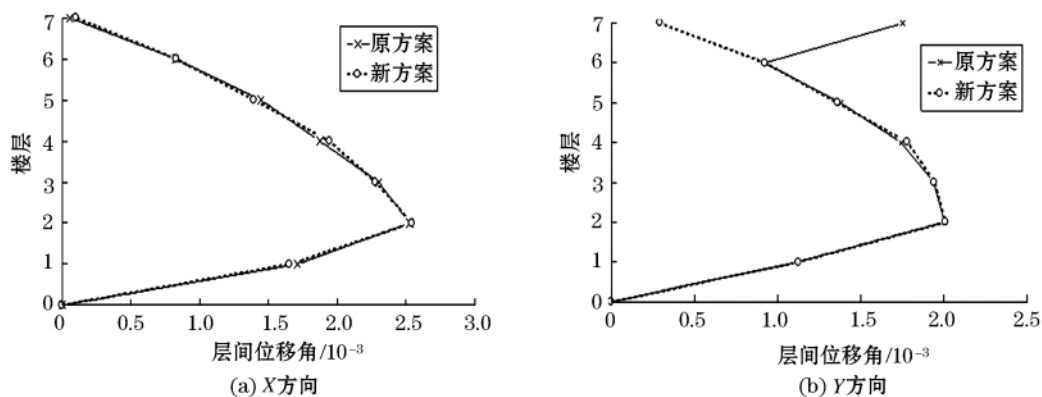


图5 楼层层间位移角

Fig. 5 Interstory drift angle of each story

由图5可知,改变纵向支撑布置位置对整体结构的刚度影响不大,对层间位移角的改变很小,并不能通过改变纵向支撑布置位置来改善结构Y方向刚度变化不均匀。所以,在横向也就是山墙上增设十字形中心支撑来改善Y方向的刚度变化不均,同样,采取截面为L40×5角钢的中心十字形支撑,得到Y方向的层间位移角变化如图5所示。

从图6可以得到:山墙加支撑对减小原结构的层间位移贡献不大,但能够显著减小新加层部分Y方向的层间位移,使整体结构X、Y方向的刚度变化均匀。所以,本工程在山墙加设十字形支撑减小加层部分与原结构刚度差异,对加层后结构较有利;从表3可看到,加支撑后,加层前后周期变化很小。



(注:原方案指最初加层改造方案;新方案指加设山墙支撑的方案)

图6 楼层层间位移角

Fig. 6 Interstory drift angle of each story

### 4.4 新老结构顶层加速度

对加层改造前后结构进行动力时程分析,采用适合于 2 类场地土的 El Centro 波,时间间隔 0.02s,持续时间取 30s,最大加速度值为  $341.7 \text{ mm/s}^2$ ,按 7 度(0.15g)的多遇地震分析,最大加速度为  $550 \text{ mm/s}^2$ ,加速度比例系数取 1.61。得到在 X、Y 方向地震波作用下的结构顶层加速度值见表 3。

表 3 顶层最大加速度表

Table 3 Maximum accelerations of top floor

mm · s <sup>-2</sup>		
地震方向	原结构	加层结构
X 方向	2379	2422
Y 方向	2451	4099

从表 3 中可以看出,加层前后 X 方向地震作用下结构顶层最大加速度变化不大,但在 Y 方向的地震作用下结构顶层最大加速度增加很大,表明新建结构的 Y 向刚度与原结构差异较大,制定改造方案时需特别考虑。

## 5 破坏模式

在大震作用下,结构处于弹塑性工作状态,需满足抗震规范的第 2 阶段设计要求,承载性能分析已不能有效估计结构屈服后的变形能力及在大震时力学行为<sup>[6]</sup>。静力非线性分析可以估计结构和构件的非线性变形,结果比承载力设计更接近实际。静力非线性分析相对于非线性时程分析,可以获得较为稳定的分析结果,减少分析结果偶然性。

对选定方案进行静力非线性的 Pushover 分析,在梁两端定义 Default - M3 铰,柱两端定义 Default - PMM 铰。所有塑性铰均为 FEMA - 356 铰,对每一个自由度,都定义一个用来给出屈服值和屈服后塑性变形的力 - 位移曲线,通过 A - B - C - D - E 的曲线来控制,如图 7,其中点 B 代表铰的屈服,A - B 之间假定结构为刚性,当铰达到 C 点时,开始失去承载能力,点 IO、LS 和 CP 代表铰的能力水平,他们分别对应于直接使用、生命安全及防止倒塌。PUSH 工况采用位移控制,构件卸载方法采用卸载整个结构,几何非线性同时考虑大变形和 P - Δ 效应,不考虑推覆过程中层间刚度的影响<sup>[7]</sup>,侧向加载模式采用“重力 + 振型 1(X 方向)”,得到结构加层改造前后的塑性铰发展情况如图 8 所示。

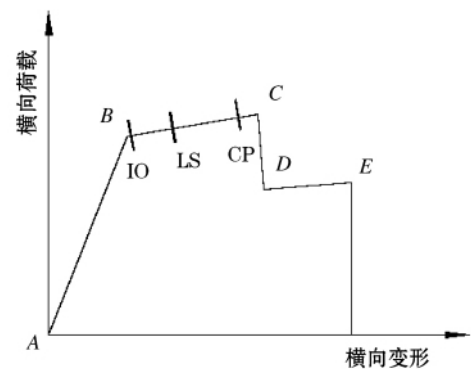


图 7 力 - 位移曲线

Fig. 7 Force-displacement curve

从图 8 可知,结构在加层改造前后均是由第 2 层梁端开始出现塑性铰并向其它部位发展的,结构满足强柱弱梁的抗震设计基本要求。且都是由于底层柱下端先破坏而引发整体结构失效,但加支撑后加层结构底层柱上塑性铰不同时产生,原结构底层柱上塑性铰在同一层上产生,加速结构的破坏。主要是由于加层部分增加了底层的剪力,导致底层柱受力更大,铰范围扩大,但不形成连续倒塌的机构。但总体来看,加层改造对结构破坏模式没有产生明显影响,只是产生塑性铰的过程不同。

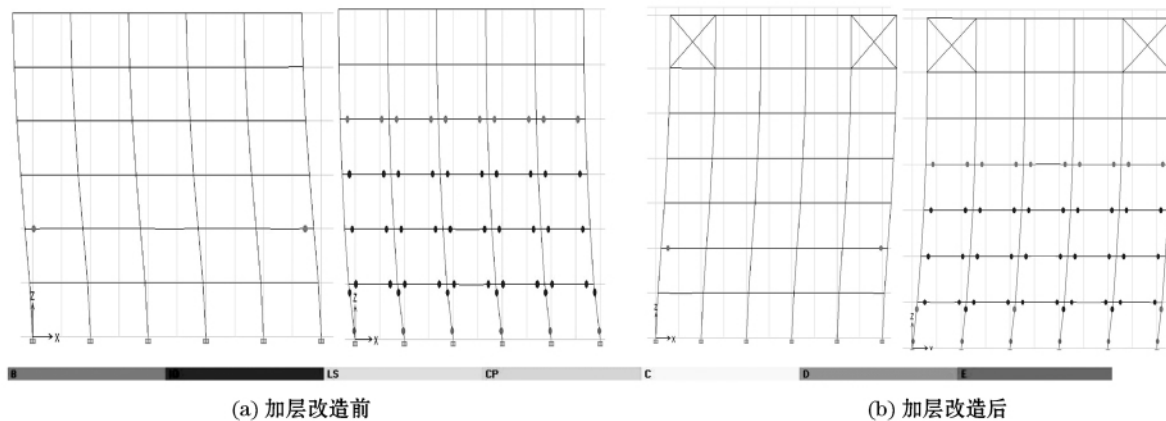


图 8 塑性铰发展

Fig. 8 Development of plastic hinge

## 6 结论

加层改造在满足新功能要求的同时,要本着先整体后局部的原则,找出结构在静力及动载作用下的薄弱部位,针对薄弱部位进行加强,提高结构的整体性。

(1) 加层改造对原结构竖向构件内力影响显著,设计时必须验算原结构承载力,且柱连接部位需做加强,保证原结构安全。

(2) 加层后结构动力性能较加层前有较大变化,加层设计不能只立足于保证加层部分的安全,需先考察整体性能,进而进行细部构造设计,以满足整体对局部力学特性的需求。

(3) 轻钢加层改造不会显著改变结构的破坏模式,但在水平地震作用下,加层后结构顶层的刚度小、变形大,为保证结构整体性,在顶层加设柱间支撑较为有利,保证结构整体协调变形。

## 参考文献

- [1] 王元清,石永久,陈宏,等.现代轻钢结构建筑及其在我国的应用[J].建筑结构学报,2002,23(1):2-8.  
WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, CHEN Hong, et al. Contemporary lightweight steel Structure and its application in china[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 2-8.
- [2] 中国建筑标准设计研究院. ETABS 中文版使用指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.  
Building Standard Design & Research Institute of China. ETABS Chinese version of the user guide[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2004.
- [3] 建筑结构荷载规范(GB50009-2001) [S].北京:中国建筑工业出版社,2002.  
Code for building structural load (GB50009-2001) [S] Beijing: China Building Industry Press, 2002.
- [4] 建筑抗震设计规范(GB50011-2010) [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Code for building structural load (GB50011-2010) [S] Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [5] 黄怡,王元清,陈宏,等.多层轻钢框架结构的抗震性能分析[J].工业建筑,2006,36(12):73-75.  
Huang Yi, Wang Yuanqing, Chen Hong, et al. Analysis of aseismic properties of light-weight steel multi-storey structure [J]. Industrial Construction, 2006, 36(12): 73-75.
- [6] 刘昱,高小旺,张涛.基于SAP2000的轻钢加层结构的抗震性能分析[J].工程抗震与加固改造,2008,30(6):100-104.  
Liu Yu, Gao Xiao-wang, Zhang Tao, Analysis of seismic performance of the storey-adding structures of light-weight steel based on sAP2000 [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(6): 100-104.
- [7] 钱稼茹,罗文斌.静力弹塑性分析—基于性能/位移抗震设计的分析工具[J].建筑结构,2000,30(6):23-26.  
Qian Jiaru, Luo Wenbin. Static pushover analysis—an analytical tool for performance/displacement-based seismic design [J]. Building Structure, 2000, 30(6): 23-26.