

超限倾斜结构的弹塑性动力分析

马凯

(北京市建筑设计研究院,北京 100045)

摘要 结合克拉玛依市科技博物馆工程,对超限倾斜结构设定性能设计目标,并针对性能目标提出抗震措施及抗震构造措施.考虑结构材料的非线性属性,采用静力非线性分析方法,分析倾斜框架-剪力墙结构在地震作用下的响应,尤其是结构在罕遇地震作用下的非线性动力特性.基于罕遇地震的弹塑性时程分析表明,最大层间位移角满足1/100的限值条件.结构在罕遇地震下也是安全可靠的,剪力墙尚处在弹性范围,未出现塑性铰,形成有利的抗震防线,连梁及框架、斜撑均出现塑性铰.其中连梁的塑性程度较深,充分发挥耗能构件性能,在大震后需修复后方可使用,而框架梁及柱塑性铰程度较浅,可不经修复直接投入使用.

关键词 超限结构, 塑性铰, 耗能能力, 非线性

引言

1 工程概况

克拉玛依市科技博物展览馆工程位于克拉玛依市新区、世纪大道以南、迎宾路以西,集科技、博物、规划于,建筑面积61000 m²,建筑层数:地上4层(局部设有4层夹层),地上裙房1层,地下1层,建筑高度:42.1m.建筑效果图如图1所示.建筑造型呈独特的倾斜形状,灵感来自于独特的雅丹地貌,建成后将成为克拉玛依乃至新疆地区的地标式建筑.建筑及结构设计由北京市建筑设计研究院原创并完成.

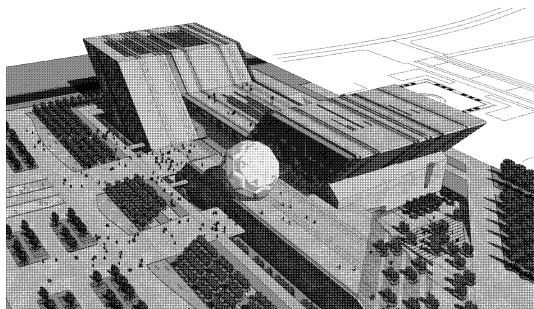


图1 建筑效果图

Fig. 1 Effect drawing of the Structure

建筑成巨型倾斜双塔造型,结构基本跨度为9米、18米及27米,采用全预应力钢筋混凝土结构,

内部均采用清水混凝土.双塔间设置36米跨度的连廊结构,连廊采用空间张弦结构,并设置隔震支座,有效避免发生连体抗震不利作用.

2 结构体系

为满足特殊的建筑造型要求,采用现浇钢筋混凝土框架-剪力墙结构体系,利用中央的电梯井形成核心筒,以增强结构的整体抗扭性能.倾斜部位设置斜向钢筋混凝土柱,由于跨度较大,超出普通钢筋混凝土结构的适用范围,因此在梁中采用后张预应力技术,框架梁采用后张有粘结预应力,次梁采用后张无粘结预应力.

中庭为跨度36米的无柱大空间,采用空间张弦梁形式,两端设置隔震滑动连接.

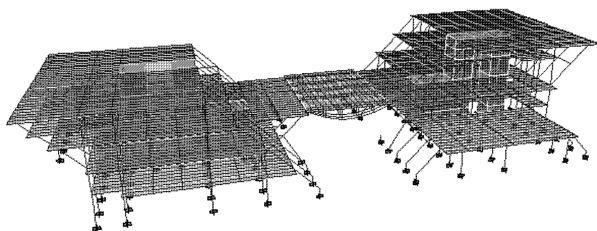


图2 结构三维示意图

Fig. 2 Three dimensional schematic diagram of the Structure

倾斜结构的三维示意图如图2所示.地下室顶板作为上部结构的嵌固层,考虑平扭耦联的扭转效应.

3 输入地震波

根据新疆防御自然灾害研究所提供的两组工程所在场地附近的实测地震波和一组人工地震波进行时程分析^[1-3],地震波如图3~5所示.

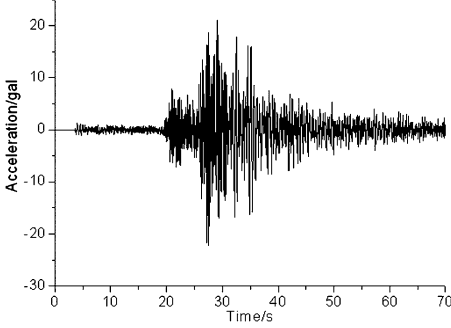


图3 天然波
Fig. 3 Natural Wave 1

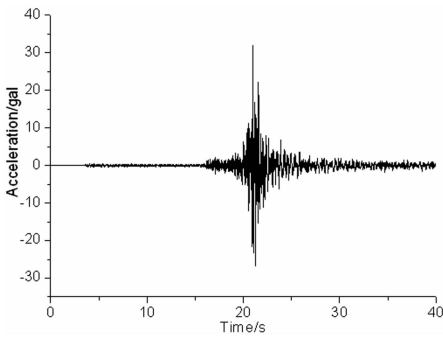


图4 天然波2
Fig. 4 Natural Wave 2

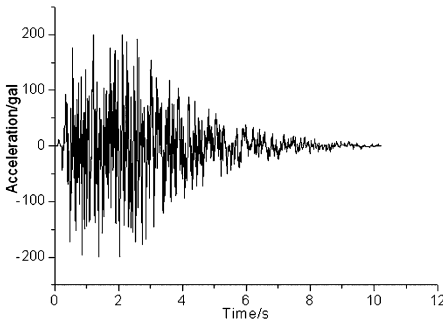


图5 人工波
Fig. 5 Manual Wave

4 弹塑性时程分析

为进行弹塑性静力和时程分析,需要建立准确反应结构弹塑性承载能力的有限元模型.

在抗震分析建模过程中,运用塑性铰方法建立弹塑性模型,在各框架梁的两端设置弯矩铰 $M_y - M_z$,在框架柱两端设置轴力弯矩铰 PMM,墙体按非

线性分层壳单元模拟^[4].

分层壳单元^[5-7]基于复合材料力学原理将一个壳单元划分成很多层,各层可以根据需要设置不同的厚度和材料性质(混凝土、钢筋等).在有限元计算时,首先得到壳单元中心层的应变和曲率然后根据各层材料之间满足平截面假定,由中心层应变和曲率得到各层的应变,进而由各层的材料本构方程得到各层相应的应力,并积分得到整个壳单元的内力.分层壳单元考虑了面内弯曲-面内剪切-面外弯曲之间的耦合作用,比较全面地反映了壳体结构的空问力学性能^[8].

广义塑性铰骨架曲线如图6所示.

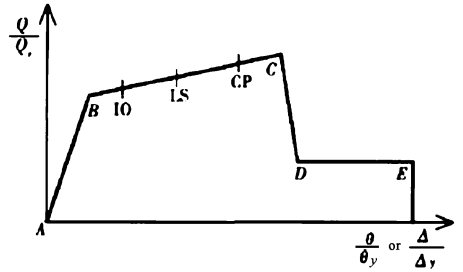


图6 塑性铰的广义力-位移关系的骨架线
Fig. 6 General force - deformation skeleton curve of plastic hinges

纵坐标 Q 为塑性铰的广义力, Q_y 为塑性铰的广义屈服强度,可以为力或弯矩;横坐标为塑性铰广义位移,可以为位移 Δ 或转角 θ . A 为起始原点, B 为塑性铰的屈服点, C 为塑性铰的极限承载力点, D 为塑性铰的剩余承载力点, E 为塑性铰失效,退出工作. IO (Immediate Occupancy) 表示可修, LS (Life Safety) 表示可修但修理费用较高, CP (Collapse Prevention) 表示不可修.

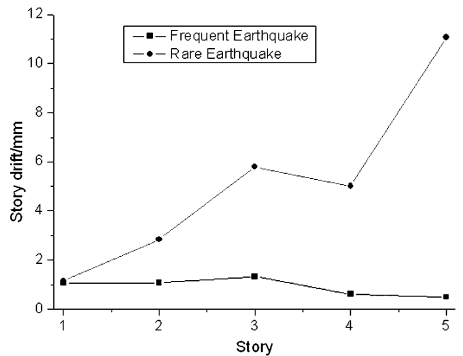


图7 楼层位移角
Fig. 7 Displacement angle on every story

罕遇地震作用下一定数量的构件将进入弹塑性承载状态,结构阻尼取为 0.05,按规范要求将时

程曲线按峰值加速度进行放大输入。

各楼层的层间位移响应及结构顶点位移时程曲线如图7、8所示。为了对比地震响应,将小震和大震作用下的层间位移曲线进行对比。其中,图7中数字4表示四层夹层,数字5表示四层。

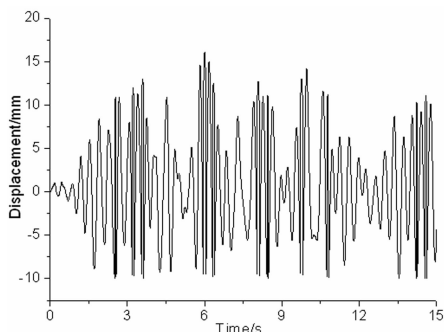


图8 顶点位移时程曲线

Fig.8 Displacement time-history curve at top point

由图7、8可见,结构弹塑性响应最大层间位移角出现在顶层,数值为1/200,满足规范要求的1/100的限值要求。部分结构构件进入塑性状态后,结构部分位置承载能力和刚度的降低,不仅仅引起内力和刚度的重新分布,也使结构承受的地震作用发生变化。从位移曲线可知,克拉玛依科博馆具有足够的抗震承载力和抗侧刚度。

构件进入屈服塑性铰状态如图9所示。

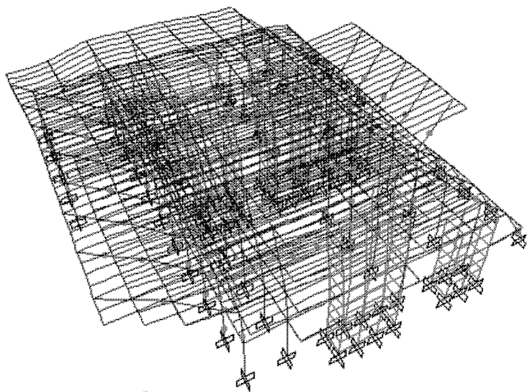


图9 塑性铰分布图

Fig.9 Distribution map of plastic hinges

根据抗震性能指标的要求,在罕遇地震下,结构构件均允许一定程度的屈服。而上述计算表明,结构构件(斜向支撑、框架柱及框架梁)已部分达到屈服,根据图6的广义塑性铰骨架曲线定义,塑性铰都分布在B~IO范围,即结构可经轻微修理便可投入使用。

各层连梁都达到屈服状态,说明墙体连梁的耗能机制得到充分发挥。另外,斜向构件基本达到屈服,说明倾斜结构的斜向构件承担了较大的水平作用力,在抗震设计中应特别加以重视,本工程的斜向支撑采用全长箍筋加密,提高构件的延性^[9]。

5 结论

(1)在罕遇地震下结构也是安全可靠的,剪力墙尚处在弹性范围,未出现塑性铰,形成了有利的抗震防线

(2)连梁及框架、斜撑均出现塑性铰,充分发挥了耗能构件性能,在罕遇地震后需修复后方可使用。

(3)在罕遇地震作用下,结构弹塑性响应最大层间位移角出现在顶层,数值为1/200,满足规范的限值要求。

参 考 文 献

- 1 王先华,邓铁军.地震作用下高层钢-混组合结构的抗震性能分析.动力学与控制学报,2010,8(2):182~187 (Wang X H, Deng T J. Analysis of seismic performance of high steel-concrete composite structures under earthquake. *Journal of Dynamics and Control*, 2010, 8(2): 182~187 (in Chinese))
- 2 中华人民共和国行业标准. GB50011-2008 建筑抗震设计规范.北京:中国建筑工业出版社,2008 (Professional Standard of the People's Republic of China. GB50011-2008 Code for Seismic Design of Buildings. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008 (in Chinese))
- 3 裴星洙,廖述清,张立.基于建筑抗震设计规范的设计用地震动分析.世界地震工程,2006,22(2):154~160 (Pei X Z, Liao S Q, Zhang L. Analyses of seismic waves for building structure design based on the design code of earthquake-resistant structure. *World Earthquake Engineering*, 2006, 22(2): 154~160 (in Chinese))
- 4 林旭川,陆新征,缪志伟等.基于分层壳单元的RC核心筒结构有限元分析和工程应用.土木工程学报,2009,42(3):49~54 (Lin X C, Lu X Z, Miao Z W, et al. Finite element analysis and engineering application of RC core-tube structures based on the multi-layer shell elements. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(3): 49~54 (in Chinese))
- 5 Miao Z W, Lu X Z, Jiang J J, et al. Nonlinear FE model

- for RC shear walls based on multi-layer shell element and microplane constitutive model. *Proc. Computational Methods in Engineering And Science*. Sanya: Tsinghua University Press & Springe-Verlag, 2006
- 6 叶列平, 陆新征, 马千里等. 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例. *工程力学*, 2006, 23(S2): 173 ~ 183 (Ye L P, Lu X Z, Ma Q L, et al. Nonlinear analytical models, methods and examples for concrete structures subject to earthquake loading. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(S2): 173 ~ 183 (in Chinese))
- 7 缪志伟, 陆新征, 叶列平等. 高强配筋剪力墙框-剪结构的地震行为研究. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2007, 24(4): 1 ~ 6 (Miao Z W, Lu X Z, Ye L P, et al. Study on the seismic performance of frame-shear wall structures with High-strength reinforced the shear wall. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2007, 24(4): 1 ~ 6 (in Chinese))
- 8 韩小雷, 陈学伟, 林生逸等. 基于纤维模型的超高层钢筋混凝土结构弹塑性时程分析. *建筑结构*, 2010, 40(2): 13 ~ 16 (Han X L, Chen X W, Lin S Y, et al. Elasto-plastic time-history analysis of super high-rise RC structure based on fiber model. *Building Structure*, 2010, 40(2): 13 ~ 16 (in Chinese))
- 9 程绍革, 王理, 张允顺. 弹塑性时程分析方法及其应用. *建筑结构学报*, 2000, 21(1): 52 ~ 56 (Cheng S G, Wang Li, Zhang Y S. Elastoplastic time histoy analysis method and its application. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(1): 52 ~ 56 (in Chinese))

ELASTO - PLASTIC DYNAMIC ANALYSIS ON TRANSFINITE INCLINED STRUCTURE

Ma Kai

(Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China)

Abstract According to Science Museum in Kelamayi, the design goal was proposed for this transfinite inclined structure. The nonlinear properties of the materials were considered, and the nonlinear analysis method was used. Seismic reaction analysis of frame - shear wall structure was carried, especially the nonlinear reaction under rare earthquake. The results under rare earthquake show that the maximum interlayer displacement angle is less than the limit value 1/100. The structure is safe and reliable under rare earthquake. Shear wall is elastic and no plastic hinge appears, useful for the development of energy dissipation. Plastic hinges are found in coupling beams, frame beams and sprags. Plastic hinges in coupling beams have deeply developed, which are useful for the development of energy dissipation. Plastic hinges in frame beams and sprags are not so serious, and these components can be used without repairing, while the coupling beams have to be repaired after rare earthquake.

Key words transfinite structure, plastic hinge, capacity of energy dissipation, nonlinear