

泉州电信综合楼结构弹塑性分析^{*}

吕振利^① 王理^② 王亚勇^②

(^① 华侨大学土木工程系, 泉州 362011; ^② 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘要 平面与竖向布置不均匀的泉州电信综合楼属特别不规则建筑, 有必要进行罕遇地震作用下结构薄弱层(或薄弱部位)的判断及结构弹塑性变形验算. 文中介绍了结构弹塑性分析法并采用空间弹塑性推覆(PUSHOVER)模型, 对泉州电信综合大楼结构进行静力非线性分析. 计算结果表明: 结构在小震作用下变形满足规范的应小于 $1/800$ 的规定, 但对个别连梁和角柱进入塑性屈服阶段等薄弱部分的设计应加强; 结构在大震作用下变形满足规范的应小于 $1/50$ 的规定.

关键词 不规则建筑, 罕遇地震, 薄弱层, 弹塑性分析, 变形验算

分类号 TU 313

泉州电信综合大楼共13层, 总高59.5 m, 建筑面积约41 000 m². 它建成后与相邻的东海电信中心大厦及ESK大楼将以其独特新颖的形象而成为泉州市的标志性建筑. 据中国地震烈度区划图和建筑抗震设防等级分类标准, 泉州电信综合大楼的抗震设防烈度为7度. 由于该建筑平面及竖向布置不均匀, 属特别不规则建筑, 同时该工程属较重要的建筑, 有必要进行罕遇地震作用下结构薄弱层或薄弱部位的判断及结构弹塑性变形验算.

1 工程概况

泉州电信综合大楼, 如图1所示, 它拟建在东海电信中心大厦南面, 东邻刺桐西路, 南侧、西侧为民宅用地. 该大楼地上12层之1~3层为电信营业大厅, 第4层为职工之家, 5~8层为电信机房, 9~12层为通用办公室. 满铺1层地下室, 作为停车库及设备用房. 地上建筑面积近34 000 m², 地下室建筑面积7 008 m². 根据工程地质勘察报告, 该建筑场地划为三类场地. 泉州电信综合

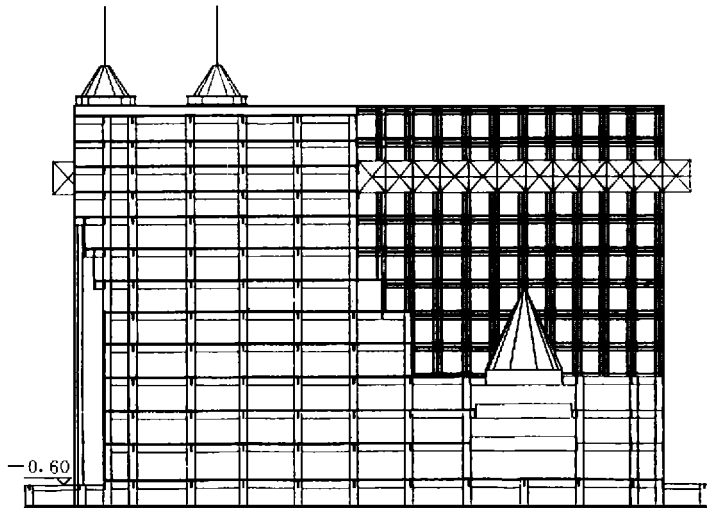


图1 结构立面图

大楼依据建筑的特点,在保证结构安全适用的前提下,选择了经济合理的框架——剪力墙结构体系。框架柱及剪力墙均落地延伸至地下室基础顶面,楼盖采用现浇钢筋混凝土梁板体系。大楼入口上方有一钢网架,其一角支撑在钢管格构架上,另外两边支撑于主体框架柱牛腿上。网架为装饰性结构,与主体结构拟采用铰接方式连接(图1)。

2 结构弹塑性地震反应分析

2.1 方法简介

结构弹塑性地震反应分析方法,是通过建立结构的计算模型,依据结构构件的弹塑性恢复力特性,对结构进行地震作用下的计算分析,从而获得结构的弹塑性反应。通过结构弹塑性地震反应分析,可以了解到结构各部位在地震作用下反应的全过程。因此,结构弹塑性地震反应分析方法,对于评价和检验建筑结构的抗震性能有着十分重要的意义。在进行结构的弹塑性分析时,比较常用的方法有静力荷载增量法和直接动力积分法这两种。静力荷载增量法最简便,但是地震作用是一种动力作用,故要假设成为一个固定水平荷载会有很多问题和缺点。地震作用和建筑物本身的性能、振型变化有着密切的关系。建筑物在逐步进入塑性屈服时,建筑物的周期 T 、振型和阻尼比等都会发生变化,所以水平力的大小和分布状况都会发生变化。因此,用一个固定的等值水平力来做静力分析,必然带来计算的误差。直接动力积分法,其计算结果随积分步长的大小以及地震波的不同而有所不同。虽然计算机的性能已大大地提高,但用逐步积分法做结构的弹塑性分析仍需要庞大的计算机容量。同时,计算结果的整理分析也是一个很繁杂的过程。直接动力积分法的分析结果虽然比较正确,但是除了实验台上的固定地震波形之外,在实际发生的地震中,对于同一地点却从不发生两次以上相同的地震波形。也就是说,每一次所发生的地震波形都不一样。因此,这种分析不能只针对单一地震波形,还需要多做几种不同的地震波分析作比较,致使同样复杂的工作需要反复操作好几次。反应谱强度分析法是静力荷载增量法的改进方法,它的水平力的大小随着结构周期的变化而变化。水平力的大小由设计反应谱来确定,其分布状况根据结构的振型变化而求得。所以,当结构逐步进入塑性状态时,水平力的大小和分布都随着结构周期、振型的变化而变化。反应谱强度分析法所需的时间及分析结果的整理,比直接动力积分分析法快而简便,较适合于个人电脑的处理及一般设计的需要。

2.2 理论计算模型的选择

结构弹塑性地震反应计算,应根据具体情况——结构组成、构件特点、计算机容量和计算费用等,选用简化的计算模型。目前比较成熟和通用的计算模型有等效剪切型模型、平面杆系模型和空间弹塑性模型。等效剪切型模型是以结构层为计算单元,将每层中所有柱合并成一个总的层间抗剪构件来进行计算。这种模型能快速、扼要地提供工程设计上所需的层剪力和层间位移,具有计算费用低等特点。但是,该模型无法对结构构件做仔细分析,无法考虑水平地震力引起的竖向荷载的变化对构件屈服的影响。平面杆系模型是由可带刚域的杆件组成的等效框架结构。计算中以框架每一杆件(包括梁、柱和墙)为基本构件(单元),该模型可精确求得结构各部位、各构件在地震作用下受力和变形的全过程。因此,应用该模型不仅可以求出地震过程中每一杆件是否开裂或屈服,还可以知道各杆件屈服的先后次序,从而了解整个结构的破坏形态。一般来说,当只需了解结构层剪力和层位移时,可采用剪切模型;当需要了解塑性铰出

现的确切位置及构件的破坏状态时, 结构平面及立面布置均匀时可采用平面杆系模型. 由于泉州电信综合大楼在平面和竖向布置不均匀, 对其进行抗震验算不仅需要了解该建筑在地震作用下的薄弱层位置, 还需要对结构各个构件在地震作用下的反应进行分析, 以确保结构具有良好的抗震性能. 因此, 该大楼的地震弹塑性反应分析采用空间弹塑性模型.

2.3 分析计算程序

泉州电信综合大楼的地震弹塑性反应分析, 采用空间结构弹塑性分析程序 SCM-3D 进行分析和计算. 该程序采用空间弹塑性推覆(PUSHOVER)模型, 对结构进行静力非线性分析, 其基本结构单元由梁、柱、墙和桁架组成. 在计算中, 假定单元内不发生非弹性轴向变形, 且屈服仅在单元端点集中塑性铰处发生. 结构构件的弹塑性恢复力取双线性模型. 构件的屈服轨即轴力-弯矩屈服关系, 采用梁类型和混凝土柱类型. (1) 梁类型. 这种模型假设构件的屈服仅由弯矩造成, 如图 2(a) 所示. (2) 混凝土(RC)柱类型. 这种模型假设构件的屈服要考虑由柱端弯矩和轴力共同作用所形成的屈服轨. 对于屈服轨内的任何轴力与弯矩的组合情况, 即对应于图中曲线内的点均认为构件处于弹性状态; 相反, 若轴力与弯矩组合处于曲线上或曲线外, 则构件进入塑性阶段, 如图 2(b) 所示.

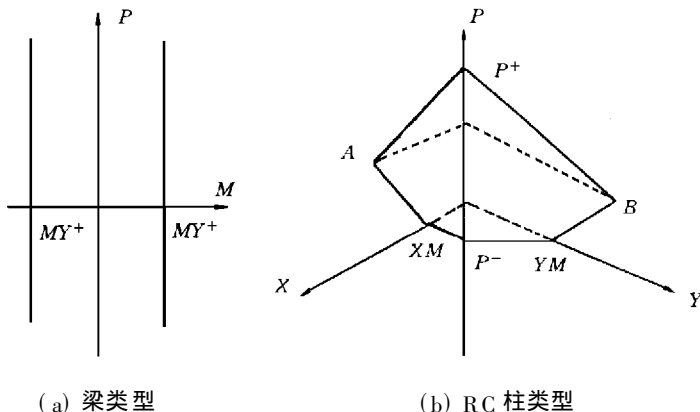


图2 杆件屈服关系

3 结构计算与结果分析

3.1 计算模型

按照设计院提供的全部结构初步设计图、TBSA 程序计算模型和静力计算结果, 泉州电信综合大楼的主体结构为 RC 框架-剪力墙结构, 其结构平面图如图 3 所示. 在主体结构入口处上方的 10~11 层放置一个装饰性钢网架. 由于结构逐层缩进, 使得结构平面与竖向布置不均匀. 为尽可能全面地分析结构的抗震性能, 其主体结构采用空间梁柱墙模型(图 4a), 网架采用空间桁架单元(图 4b).

3.2 小震作用下的计算结构与分析

为检验结构计算模型选取的正确与否, 我们假定结构杆件全部处于弹性阶段. 由此, 获得结构在小震作用下的基本周期(T)、剪力比(V_0/G_e^{-1})和结构顶点位移(u_1)的结果如表 1. 表中给出 TBSA 程序的计算结果. 通过对比, 发现 SCM-3D 与 TBSA 程序两者之间的结果十分吻合, 得到的基底剪力满足抗震规范第 4.1.2 条第 3 款的规定, 表明计算模型的选取是可行的.

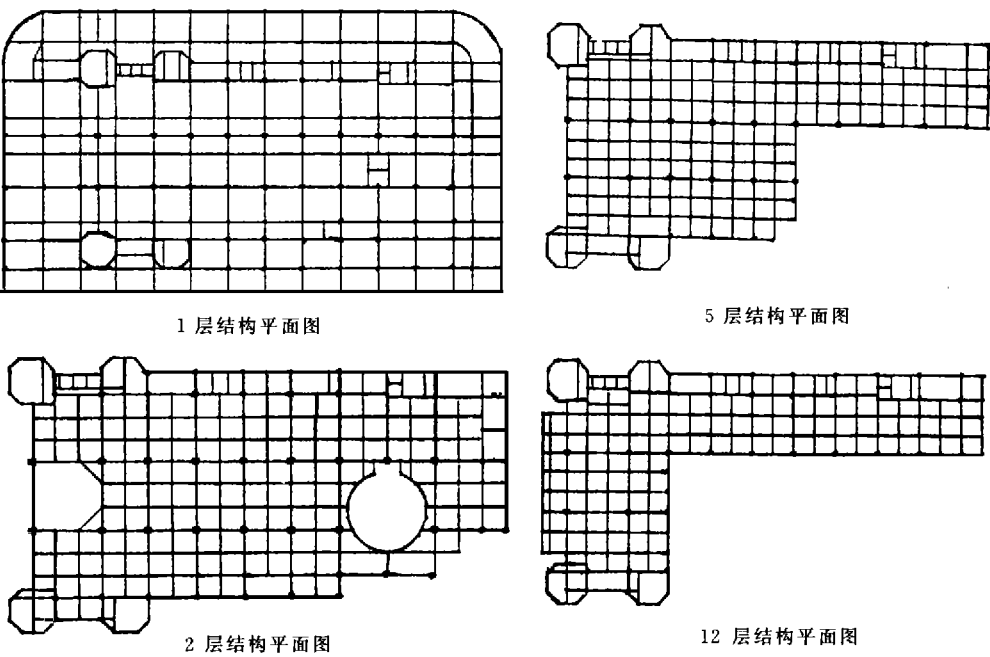


图 3 部分结构平面图

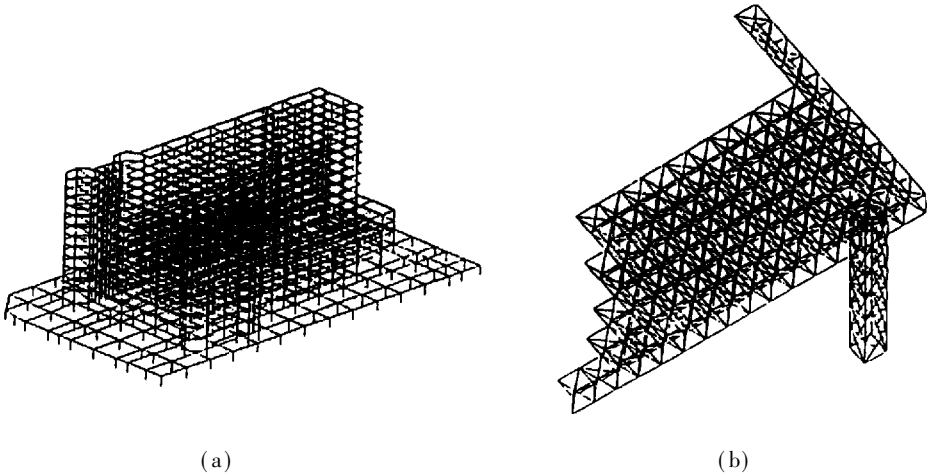


图 4 结构计算模型

结构在小震作用下的位移和层剪力结果见图 5。梁柱的屈服杆件见表 2。从计算结果看,网架部分由于受主体结构位移的影响,内力发生较大变化,在小震作用下部分杆件进入屈服阶段,建议修改截面设计,避免塑性杆件的出现。RC 主体结构由于平面与竖向布置不均匀,结构扭转效应明显,再加上角柱配筋偏小(配筋率为 0.8%),因此第 7 层的角柱在小震作用下

表 1 结构小震作用下结果

程序	方向	T	$V_0G_e^{-1}/(\%)$	u_t/cm
TBSA	X	1.66	2.18	2.20
	Y	2.05	1.94	3.10
SCM-3D	X	1.68	2.17	2.19
	Y	2.21	1.68	3.09

已经屈服. 另外, 位于八角塔楼内的连梁也已进入屈服状态, 建议修改截面设计, 并采取适当的补强措施, 防止在小震作用下结构构件破坏的发生. 网架与主体结构的连接部位也应予以加强.

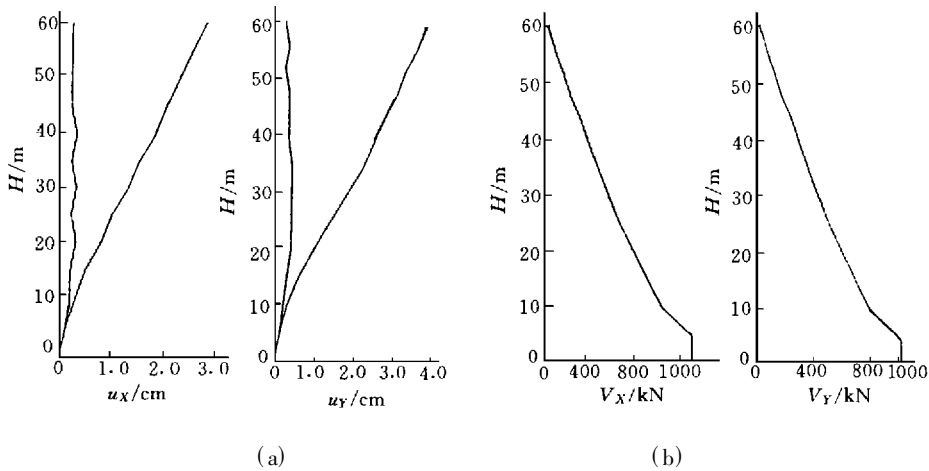


图 5 结构在小震下层位移 (a) 和层剪力 (b)

按照抗震规范^[1]和高层建筑设计与施工规程^[2]的有关规定, 对装修要求高的框架——剪力墙建筑结构, 在小震下的层间位移角限值为 $1/800$, 结构顶点位移与总高度之比的限值为 $1/850$. 小震作用下结构顶点位移为 2.8 cm (X 方向) 和 3.8 cm (Y 方向); 顶点位移与结构总高度之比为 $1/2125$ (X 方向) 和 $1/1566$ (Y 方向); 最大层间位移角为: $1/1600$ (X 方向) 和 $1/1200$ (Y 方向). 结构在小震下其变形满足规范的要求.

表 2 结构小震下屈服杆件

层号	梁跨号	柱号	层号	梁跨号	柱号
3	38		10	31	
4	38		10	38	
5	38		11	31	
6	38		11	38	
7	38	104	12	31	
7		136	12	38	
8	38		13	31	
9	38		13	38	

3.3 大震作用下的计算结果与分析

结构在大震作用下的位移见图 6. 塑性铰的发生位置略. 在大震作用下结构的部分构件产生了塑性铰, 这表明结构进入弹塑性阶段其结构的破坏已经发生. 但由塑性铰位置可知, 绝大部分的塑性铰均发生在梁或连梁上. 此类塑性铰的产生改变了结构的内力分布和结构周期, 吸收部分地震能量, 防止结构的进一步破坏, 保护结构不致倒塌. 大震作用下, 部分梁、柱进入塑性屈服阶段, 此时结构的顶点位移分别为 15.5 cm (X 方向) 和 31.4 cm (Y 方向).

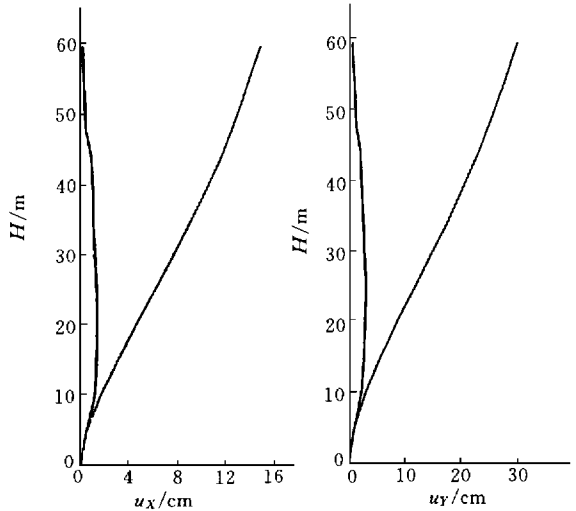


图 6 结构大震下层位移

(Y 方向); 顶点位移与结构总高度之比为 $1/384$ (X 方向) 和 $1/189$ (Y 方向); 最大层间位移角为 $1/312$ (X 方向) 和 $1/154$ (Y 方向). 由此可知, 结构在大震下变形也是满足抗震规范^[1]和高层建筑结构设计^[2]与施工规程^[3]的有关规定. 特别需要指出的是结构中装饰性网架部分在大震作用下, 部分杆件进入塑性屈服阶段, 应适当增大其截面尺寸, 避免塑性铰的发生. 另外, 由于主体结构的扭转, 必然使格构架与平面网架的连接处产生较大扭矩, 应引起高度注意. 在两者的连接部分应考虑网架与格构架的抗扭问题.

4 结论

采用国际上通用的 PUSHOVER 分析程序, 对泉州电信综合大楼进行空间弹塑性计算分析. 其结果表明, 结构在小震作用下变形能满足规范的要求, 结构在大震作用下其变形也满足规范的规定. 个别连梁和角柱在小震作用下进入塑性屈服阶段, 地震作用下网架中部分桁单元应力较大, 接近或超过材料的极限屈服强度值, 建议修改该部分单元的截面设计. 通过本文分析, 找到了结构的薄弱环节, 便于采取措施给予加强, 才能保证结构在小震时处于弹性变形阶段, 中震时结构处于弹塑性阶段, 大震时结构产生的变形距结构倒塌时的变形还有一段距离.

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国建设部. GBJ 11-89 建筑抗震设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989. 25 ~ 28
- 5 中华人民共和国建设部. GBJ 3-91 钢筋混凝土高层建筑设计^①与施工规程. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 37 ~ 39

Structural Analysis of Telecom Building in Quanzhou with Emphasis on Its Elastoplasticity

Lu Zhenli^① Wang Li^② Wang Yayong^②

(^① Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou;

^② China Res. Inst. of Arch. Sci., 100013, Beijing)

Abstract Telecom composite building in Quanzhou belongs to a quite irregular building which arranges unevenly both in plane and in elevation. It is necessary to judge the structural weak storey or weak position under rare earthquake. The authors make a brief account of the method of elastoplastic analysis and adopt a PUSHOVER mould of spatial elastoplasticity by which a static nonlinear analysis is conducted on the structure of Quanzhou telecom composite building. As shown by results of computation, under weak earthquake, structural deformation satisfying the criteria should be smaller than $1/800$ of the regulation, with specific connecting beams and corner columns coming into plastic yield stage which as weak parts need to be strengthened in structural design; under violent earthquake, structural deformation satisfying the criteria should be smaller than $1/50$ of the regulation.

Keywords irregular building, rare earthquake, weak storey, elasto-plastic analysis, checking computation of the deformation