

# 污水处理厂综合楼结构抗震超限验算与措施

张 楨

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

**摘 要:**为保护城镇排水安全,基于污水处理厂建筑设计平面布置及功能设置的要求,我国部分污水处理厂综合楼的结构形式越来越趋向于复杂化、不规则化,并因此带来了结构设计中的超限问题。为了提高超限建筑工程的抗震可靠性和安全性,结构设计中应采用时程分析法进行多遇地震下补充计算等结构超限对策,并通过专项审查。结合工程实例,阐述了异形柱框架-剪力墙超限多层建筑在设计计算与分析中所采取的计算方法与措施。

**关键词:**结构不规则;抗震超限验算;抗震构造措施;多层综合楼

中图分类号: TU31

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)01-0204-04

## 1 概 述

本工程为上海某污水处理厂工程。该工程中的综合楼由办公区域、展示区域、办公区域三部分构成。综合楼采用现浇钢筋混凝土异形柱框架-剪力墙结构;基础采用桩+全现浇钢筋混凝土条形承台基础形式。地下室埋深为2.920 m,综合楼以地下室顶板面作为嵌固端,顶板厚度均取180 mm。混凝土强度等级:C35,P6。上部结构最大高度约为13.75 m,未超过设防烈度为7度时的异形柱框架-剪力墙结构的最大适用高度(40 m);上部混凝土强度等级取C30。该综合楼为平面、竖向规则性超限多层建筑,设计中考考虑空间分析(SATWE与PMSAP)两种程序进行验算分析比较,分析方法为扭转耦联的CQC振型分解反应谱法,同时补充计算多遇地震下的弹性动力时程分析,充分考虑较多振型以充分考虑高阶振型的影响。

## 2 结构超限情况分析

建筑形体及其构件布置的不规则性包括平面不规则和竖向不规则,具体划分依据《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB 50011—2010)中3.4节及《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149—2017)中相关规定。结构设计时需首先判断其不规则性,通过分析,该单体的不规则性情况分析见表1。

依照规范,对照该工程进行判断:

(1)建筑物最大高度约为13.75 m,按抗震设防烈度7度设计,未超过规范异形柱框架-剪力墙结

构的最大适用高度(40 m)。

(2)根据SATWE计算结果,在考虑偶然偏心影响的地震作用下,楼层水平位移和层间位移的比值如下:综合楼中单元(展示区域)1.39,大于1.2,属于平面不规则结构,但小于《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB 50011—2010)中不大于1.50的规定,同时满足《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149—2017)中不大于1.45的限值。

(3)地下室顶板作为上部结构的嵌固端,局部区域楼板洞口宽度与该层楼板典型宽度比值大于现行规范的限值50%。如综合楼(A~M轴楼梯间加南北采光井开洞处)为79.74%,属平面不规则结构,但楼板的开洞面积与该层楼面面积的比值,综合楼为18.45%,小于《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB 50011—2010)中规定的30%的要求。

(4)底层至三层局部平面凹进长度:综合楼左单元(办公区域)底层至三层4~6/C~E轴处为40.87%,均大于现行规范限值30%,属于平面不规则结构。

(5)二层及以上楼板局部区域,楼板有效宽度与该层楼板典型宽度比值的最不利处:综合楼左单元(办公区域)二至三层1~6/C~E轴处为19.23%;综合楼中单元(展示区域)二至三层8~14/C~F轴处为41.36%。均大于现行规范限值50%,属于平面不规则结构。

(6)三层局部收进的横向尺寸与下层的比值:综合楼左单元(办公区域)5~11/F~L轴处为35.31%;综合楼中单元(展示区域)8~9/7/A~C轴处为32.12%;综合楼中单元8~14/E~K轴处为30.42%或40.28%。均大于现行规范限值30%,属于竖向不规则结构。

收稿日期: 2020-06-02

作者简介:张楨(1987—),男,学士,工程师,从事结构设计工作。

表1 单体的不规则性情况分析

单体	项目	抗震规范(2016年版) (GB 50011—2010)要求	异形柱规范(JGJ 149—2017)要求	实际情况	结论
综合楼	适用高度	120 m	40 m	约 13.750 m	符合
	高宽比		4.0	办公区域单元约为 0.859 展示区域单元约为 0.929	符合
	结构 规则性	平面规则性、竖向规则 性见 3.4.3 条	楼层位移比不应 大于 1.45	楼层位移比大于 1.2, 小于 1.45	扭转不规则
				底层至三层局部凹口大于 30%	凹凸不规则
				底层至四层局部楼板有效宽度小于 50%	楼板局部不规则
			三层局部收进的水平向尺寸大于下层 25%	侧向刚度不规则	

(7)第四层小面积楼层,计算中定义为小塔楼,计算过程内力放大系数取 1.5。

综上所述,该综合楼为平面、竖向规则性超限多层建筑。

### 3 结构超限计算及对策

综合楼在结构分析与计算中采取了以下超限对策:

(1)通过桩位的合理布置,使群桩形心尽量和上部结构荷载中心重合,同时控制建筑物中心最大计算沉降量,以减少房屋的不均匀沉降,中心计算值不大于 5.0 cm。通过加强地下室刚度,充分提高建筑物调节不均匀沉降差的能力。实际计算中发现综合楼中心计算沉降量为 3.16 cm,符合现行规范要求。

(2)对上部结构单元拼接后,可能造成的平面不规则(如平面凹口大于 30%或楼板有效宽度小于 50%),通过设置抗震缝使其满足现行规范要求。

(3)设计中通过空间分析(SATWE 与 PMSAP)两种程序进行验算分析比较,分析方法为扭转耦联的 CQC 振型分解反应谱法。同时补充计算多遇地震下的弹性动力时程分析,并选用较多振型以充分考虑高阶振型的影响。综合楼采用整楼和上部各单元模型,进行结构分析和 SATWE 包络配筋。

为使保证率更高,该综合楼设计中共选用了五组实际记录和两组人工模拟时程曲线进行补充计

算,弹性动力时程分析所用地震加速度时程的最大值( $\text{cm/s}^2$ ),多遇地震时取 35,罕遇地震时取 200。计算结果表明:

a. 多组时程波的平均地震影响系数曲线与 CQC 振型分析反应谱法所用的地震影响系数曲线相比均小于 20%的结构主要振型的周期点。

b. 每条时程曲线计算所得结构底部剪力与 CQC 振型分析反应谱法计算结果相比,均大于 65%。

c. 多条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值与 CQC 振型分析反应谱法计算结果相比,均大于 80%。

(4)对扭转不规则,则增强建筑物周围刚度,提高结构的抗扭能力;对结构第一、二、三周期中扭转分量所占比例调整至合理范围;尽量减少结构质心与刚心之间的偏心,降低结构的扭转效应,如均匀布置抗侧力构件等措施,使位移比控制小于 1.45。且结构分析时,充分考虑了双向地震扭转效应影响。

该工程中综合楼两种空间分析程序(SATWE/PMSAP)位移角及位移比计算结果见表 2。

扭转周期及平动周期计算结果见表 3。

有效质量系数、楼层最小地震剪力系数值计算结果见表 4。

该层与相邻上层的竖向侧向刚度比( $R_{atx_1}$ 、 $R_{aty_1}$ )计算结果见表 5。

表2 两种空间分析程序(SATWE/PMSAP)位移角及位移比计算结果

单体	地震 方向	地震作用下最大层间位移角				风荷载作用下最大层间位移角				最大(层间)位移、 平均(层间)位移比值	
		SATWE		PMSAP		SATWE		PMSAP		SATWE	PMSAP
		比值	所在层	比值	所在层	比值	所在层	比值	所在层		
综合楼 左单元	X 向	1/1 170	3	1/1 234	4	1/3 311	3	1/2 644	4	1.33(1.41)	1.436
	Y 向	1/939	4	1/1 374	4	1/4 491	3	1/4 094	4	1.43(1.43)	1.355
综合楼 中单元	X 向	1/1 641	3	1/1 789	3	1/4 650	3	1/3 766	3	1.37(1.39)	1.374
	Y 向	1/1 102	3	1/1 170	4	1/4 390	3	1/3 941	3	1.17(1.25)	1.345

表3 扭转周期及平动周期计算结果

单体	自振周期 /s	SATWE 计算值	PMSAP 计算值	规范限值
综合楼 左单元 (办公区域)	$T_1$	0.508 0	0.471	
	$T_2$	0.450 1	0.414	
	$T_3$	0.421 4	0.379	
	扭转周期	0.331 6	0.379	
	第一平动周期	0.508 0	0.471	
综合楼 中单元 (展示区域)	$T_1$	0.438 7	0.415	
	$T_2$	0.358 8	0.353	
	$T_3$	0.286 1	0.276	
	扭转周期	0.286 1	0.276	
	第一平动周期	0.438 7	0.415	

表4 有效质量系数、楼层最小地震剪力系数值计算结果

单体	判别参数	SATWE 计算值	PMSAP 计算值	规范限值
综合楼 左单元 (办公区域)	有效 质量系数	X向:95.16%	X向:99.04%	>0.016
		Y向:94.03%	Y向:99.50%	
	楼层最小 地震剪力 系数值	X向:5.06%	X向:5.44%	
		Y向:4.76%	Y向:4.81%	
综合楼 中单元 (展示区域)	有效 质量系数	X向:91.80%	X向:99.90%	>0.016
		Y向:91.81%	Y向:99.92%	
	楼层最小 地震剪力 系数值	X向:5.22%	X向:5.24%	
		Y向:5.06%	Y向:5.12%	

分析上述表格中数据可知,SATWE 和 PASAP 两种空间分析程序计算所得的结构各项性能指标均满足现行规范要求。

(5)对传递整个地震水平力的重要构件。如地下室顶板及各层楼板连接薄弱处(凹口大于30%、楼板有效宽度小于50%处),采取以下措施:

表5 与相邻上层的竖向侧向刚度比计算结果

单体	方向	SATWE 计算值	PMSAP 计算值	规范限值
综合楼 左单元 (办公区域)	X向比值	2.32		大于70%, 或小于上三 个楼面平均 值的80%
	Y向比值	2.59		
综合楼 中单元 (展示区域)	X向比值	1.719 6		
	Y向比值	1.865 0		

a.地下室顶板作为嵌固端,拟采取的措施如图1所示。

原设计顶板嵌固条件分析:

情况1处:

开洞率:12.28/15.40=79.74% > 50%。

楼板有效宽度:2.420 m。

平面不规则超限。

情况2处:

开洞率:7.74/15.40=50.26%,接近50%。

楼板有效宽度:8.260 m。

内侧楼板宽:1.940 m < 2.0 m。

平面不规则超限。

情况3处:

开洞率:9.23/15.40=59.93% > 50%。

楼板有效宽度:5.720 m。

平面不规则超限。

整体楼板开洞率:102.91/558.07=18.45%。

在尽量不影响建筑方案和功能的情况下,拟采取的加强措施如下:

情况1处:

在南侧增设结构钢筋混凝土和楼板,以增加有效楼板宽度,同时确保南侧楼板宽度不小于2.0 m。

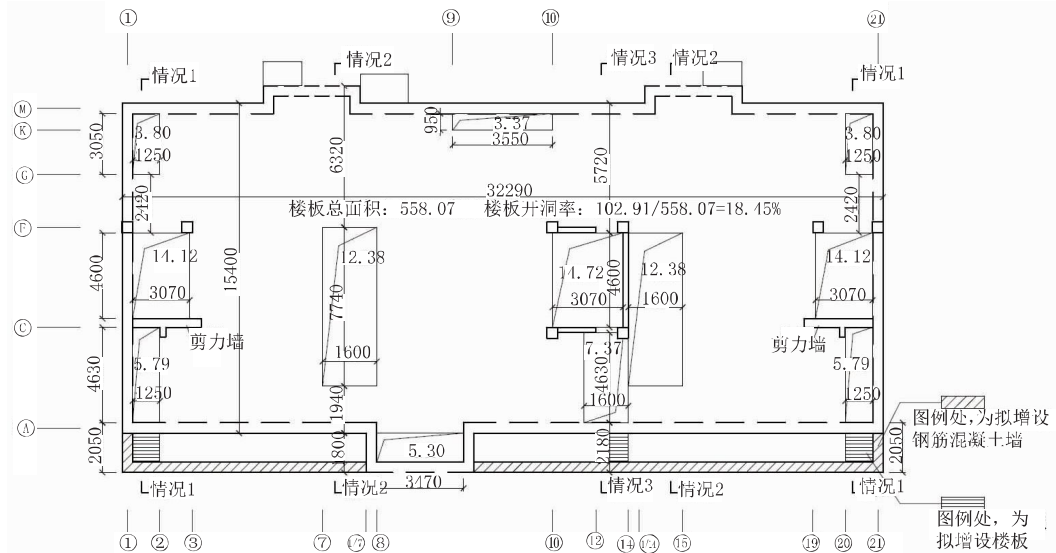


图1 地下室顶板嵌固条件分析图

在建筑物两侧,采光井处(A、C、M轴),加强纵向剪力墙与山墙连接,以有效传递抗震水平剪力。

情况2处:

在南侧增设结构钢筋混凝土和楼板,以增加有效楼板宽度,同时确保南侧楼板宽度不小于2.0m。

情况3处:

在南侧增设结构钢筋混凝土和楼板,以增加有效楼板宽度,同时确保南侧楼板宽度不小于2.0m。

b. 增加楼板厚度,地下室顶板厚度取180mm,上部室内楼板厚度取不小于120mm,卫生间楼板取不小于100mm。板内双层双向配筋,且单层单向配筋率不小于0.25%。

c. 结构分析时,该范围或洞口周围的楼板定义为弹性楼板。

d. 在多遇地震力作用下,控制板内混凝土主拉应力不超过混凝土轴心抗拉强度标准值 $f_{tk}$ (经PMSAP弹性楼板分析,楼板的最大主拉应力为829kN/m<sup>2</sup>,小于C30混凝土抗拉强度标准值2010kN/m<sup>2</sup>)。

e. 在设防地震力作用下,控制楼板内受力钢筋不屈服。例如:180mm厚地下室顶板,综合楼在设防地震力作用下,最不利点所需钢筋面积 $A_1=(0.6934 \times 2.875 \times 180 \times 1000/360) \times 0.5=498.38(\text{mm}^2)$ ,在恒活作用下所需钢筋面积 $A_2=360 \text{ mm}^2$ ,即 $A_1+A_2=858.38 \text{ mm}^2$ 。实配 $\phi 10@90(873 \text{ mm}^2)$ ,故可满足现行规范要求。其余各层验算结果均可满足现行规范要求。

(6)加强结构延性设计,严格控制墙、柱结构轴压比,对底层加强部位采取较严的抗震措施,如设置一定数量的剪力墙,控制剪力墙承担的底部地震倾覆弯矩百分比不小于50%,可满足框架-剪力墙结构要求,以增强结构在地震作用下的抵抗能力。该综合楼墙、柱最大轴压比见表6。

表6 综合楼墙、柱最大轴压比

单体	构件	SATWE 计算值	PMSAP 计算值	规范限值
综合楼 左单元 (办公区域)	墙	0.13		墙: 0.60 矩形柱: 0.85 异形柱: 0.60
	矩形柱 (框支柱)	0.46		
	异形柱	0.41		
综合楼 中单元 (展示区域)	墙	0.16		墙: 0.60 矩形柱: 0.85 异形柱: 0.60
	矩形柱 (框支柱)	0.53		
	异形柱	0.12		

综合楼底部框架柱地震倾覆弯矩百分比见表7。由上表可知,综合楼的结构延性设计满足现行

表7 综合楼底部框架柱地震倾覆弯矩百分比 单位:%

单体	方向	SATWE 计算值	PMSAP 计算值	规范值
综合楼 左单元 (办公区域)	X向	41.14	41.6	<50
	Y向	49.41	49.6	
综合楼 中单元 (展示区域)	X向	40.60	45.3	<50
	Y向	42.89	12.8	

规范要求。

(7)加强楼梯等洞口周围楼板厚度,配筋采用双层双向方法布置,适当加强配筋。适当加强如楼梯柱等楼梯间的竖向构件,并且楼梯间处的框架抗震等级提高一级。

(8)因建筑方案退台,使三层局部收进水平尺寸大于下层25%,故结构分析时,该层指定为薄弱层,同时地震剪力乘1.15放大系数,以提高其抗震能力。

(9)对承担传递梁上立柱或墙的梁和柱定义为水平转换梁和框支柱。

(10)对非结构构件的分隔墙:

a. 沿长度方向每隔不大于3m设构造柱一个,构造柱断面为200mm×240mm,柱配筋4 $\phi 12$ , $\phi 6@200$ 。

b. 沿高度方向每隔500~600mm设2 $\phi 6$ 通长拉结筋与主体柱或墙连接,并在1/2层高处设混凝土水平系梁一道,梁断面及配筋同构造柱。

c. 当分隔墙悬臂高度大于2.1m时,应设框架与主体连接,每隔不小于2层设平面外的支撑梁一道。

## 4 结语

该综合楼设计过程采用SATWE、PMSAP两种程序进行分析计算,补充计算多遇地震下的时程分析,严格控制结构各项性能指标满足要求,同时加强概念设计及抗震构造措施。

从SATWE、PMSAP的计算结果及时程分析曲线结果来看,结构的层间位移角及位移比、周期、有效质量系数、楼层最小地震剪力系数值、上下层的抗侧力结构剪切刚度比等均在合理范围内,说明结构布置基本合理,计算结果可靠。

参考文献:

- [1] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范(2016年版)[S].
- [2] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范(2015年版)[S].
- [3] JGJ 149—2017,混凝土异形柱结构技术规程[S].
- [4] PKPM系列软件用户手册及技术条件[Z].北京:中国建筑科学研究院PKPM CAD工程部,2011.