

某工业设备钢框架-支撑结构设计及分析

闵祥兵¹, 王红卫², 问晓朋³, 康小军⁴, 刘彬⁵, 刘德尚⁷, 李建刚⁶

(1. 西安长庆科技工程有限责任公司, 西安 710018; 2. 陕西西安消防安全技术有限公司, 西安 710000; 3. 中国建筑标准设计研究院有限公司, 北京 100048; 4. 陕西宇阳石油科技工程有限公司, 西安 710018; 5. 长庆油田第三采气厂, 乌审旗 017300; 6. 长庆油田(榆林)油气有限公司, 榆林 719000; 7. 长庆油田第一采气厂, 榆林 718500)

摘要: 钢结构作为一种“绿色建筑”, 具有抗震性能好、自重轻、平面布置灵活及施工周期短等优点, 广泛应用于大型工业场站建设中。本文结合中石油某轻烃厂实际工程项目, 以局部 70m 高工业设备钢框架-支撑结构设计为例, 在考虑工艺管线布置、设备安装及检修通行等因素的条件下, 该钢框架-支撑结构采用了三种支撑形式, 分别为交叉支撑、人字支撑及偏心支撑, 有效地提高结构整体抗侧移刚度, 减小自振周期, 控制结构最大层间位移角和最大位移比, 降低构件内力, 增加框架的整体稳定性。同时, 增加支撑后的框架, 可以降低框架节点域的受力, 提高框架的延性。

关键词: 钢框架-支撑结构; 抗侧移刚度; 位移; 延性

Design and analysis of steel frame-Braced structure for an industrial equipment

Min Xiangbing¹, Wang Hongwei², Wen Xiaopeng³, Kang Xiaojun⁴, Liu Bin⁵, Liu Deshang⁷, Li Jiangan⁶

1. Xi'an Changqing Technology Engineering Co., Ltd., Xi'an 710018, China
2. Shaanxi Ji'an Fire Safety Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China
3. China Institute Of Building Standard Design & Research, Beijing 100048, China
4. Shaanxi Yuyang Petroleum Technology Engineering Co., Ltd., Xi'an 710018, China
5. Changqing Oil Field No. 3 gas production plant, Wushenqi 017300, China
6. Changqing Oilfield (Yulin) Oil & GAS CO., Ltd., Yulin 719000, China
7. Changqing Oil Field No. 1 gas production plant, Yulin 718500, China

Abstract: As a kind of "green building", steel structure has many advantages, such as good aseismic performance, light deadweight, flexible layout, short construction period, etc. Based on the actual project of a Light Hydrocarbon Plant of CNPC, taking the design of steel frame-braced structure for local 70 m high industrial equipment as an example, under the conditions of considering factors such as process pipeline layout, equipment installation and maintenance passage, etc., the steel frame-braced structure adopts three kinds of bracing forms, namely cross bracing, herringbone bracing and eccentric bracing, which can effectively improve the overall lateral stiffness of the structure and reduce the natural vibration period, the maximum interstory displacement angle and the maximum displacement ratio are controlled to reduce the internal forces and increase the overall stability of the frame. At the same time, adding the braced frame can reduce the load of the frame joint area and improve the ductility of the frame.

Keywords: Steel frame-braced structure; lateral stiffness; displacement; ductility

1 工程概况

中石油某轻烃厂, 因为功能需求设置 1 座脱甲烷塔和 1 座脱乙烷塔, 脱甲烷塔高 65.676m, 直径为 2800mm 和 4800mm, 冲水重 1097t; 脱乙烷塔高 43.923m, 直径为 2300mm, 冲水重 315.1t, 2 座塔相距 10.2m。脱甲烷塔和脱乙烷塔之间共建一个多层联合钢平台, 该钢平台用于承重工艺设备、管道及检修作用。承重设备主要有脱乙烷塔重沸器、脱乙烷塔回流罐、脱乙烷塔塔顶冷凝器、及管线阀门阀组等工艺设备, 其中脱乙烷塔回流罐冲水重 80t, 脱乙烷塔重沸器、脱乙烷塔塔顶冷凝器冲水重均为 40t。

本工程所在地区抗震设防烈度为 6 度, 场地类别为 II 类, 基本风压取为 0.4kN/m² (50 年一遇), 地面粗糙度为 B 类。设计使用年限 50 年, 钢框架-支撑结构安全等级为二级, 抗震设防类别为丙类, 抗震等级为四级。基础采用桩基础, 设计等级为甲级。

2 钢平台平立面结构布置

左侧部分为 17 层钢平台, 长 18m, 宽 9m, 主要高度为 70m, 局部高 43.5m, 主要为管线、阀组及操作检修使用; 右侧部分为 2 层钢平台, 长 12m, 宽 12m, 主要高度为 11m, 局部高 5m, 主要放置一些重型设备, 有脱乙烷塔重沸器、脱乙烷塔回流罐及脱乙烷塔塔顶冷凝器等。

根据工艺平面布置可知, 该结构为平面及竖向均不规则, 平面突变, 层间侧向刚度突变, 故采用钢框架-支撑结构, 主轴两个方向沿立面均设连续支撑, 考虑到工艺管线及设备安装等因素, 支撑形式采用交叉支撑、人字支撑及偏心支撑等。立面布置见图 1。

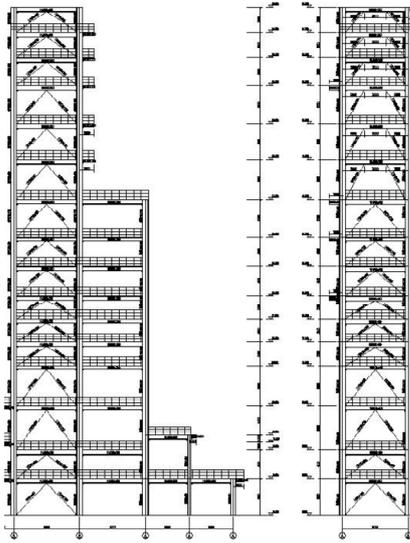


图1 钢框架-支撑立面布置

3 钢平台荷载计算

3.1 荷载种类

本工程塔架的主要荷载取永久荷载、可变荷载和偶然荷载。

1) 永久荷载：结构自重、工艺设备及管道自重、设备及管道保温自重、钢格栅板自重；

2) 可变荷载：设备操作介质重、设备充水水重、设备振动荷载、平台均布活荷载及风荷载；

风荷载：梁、柱、斜撑、栏杆和设备承受的风荷载（卧式设备、立式设备）；

疏散楼梯活荷载：3.5kN/m²；

检修平台活荷载：4.0kN/m²；

3) 偶然荷载：地震作用。

3.2 荷载组合

钢平台框架设计应按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行荷载和地震作用效应组合，并按各自最不利的效应组合进行设计。承载能力极限状态下，应分别按正常操作、停产检修、充水试压、地震作用四种工况进行荷载效应组合，取最不利情况进行构件承载力设计；正常使用极限状态，应验算正常操作荷载状态下钢梁的挠度、风荷载作用下框架顶点水平位移和层间相对位移。验算挠度、水平位移时采用荷载的标准组合。

3.3 钢平台计算

联合钢平台计算采用整体空间框架模型，利用 PKPM 中 PMCAD 和 SATWE 软件分析计算。

4 计算结果分析

4.1 阵型周期

对所有楼层强制采用刚性楼板假定，选定前 10 个阵型对结构周期及位移进行分析，结构计算周期如表 1。

表 1 结构周期计算结果

振型号	周期(s)	方向角(度)	类型
1	1.1033	6.57	X
2	1.0584	96.87	Y
3	0.5275	50.90	T
4	0.3878	135.64	X
5	0.3733	42.79	X
6	0.2447	90.54	T
7	0.1894	88.29	Y
8	0.1782	178.24	X
9	0.1513	88.47	Y
10	0.1301	175.51	X

根据周期计算结果及结合振型号 1~10 周期的结构周期振型简图，综合分析判定第一平动周期为振型号 1，即第一平动周期为 $T_1=1.1033s$ ；第一结构扭转为主的第一自振周期 $T_t=0.5275s$ ；X 方向有效质量系数为 100%，Y 方向有效质量系数为 100%；根据计算结果有 $T_t/T_1=0.478<0.9$ ，满足《高规》3.4.5 条。

4.2 位移

本次框架-支撑结构的位移计算结果如表 2：

表 2 位移计算结果

最大层间位移角	X 方向	1/2843<[1/250]	满足
	Y 方向	1/1957<[1/250]	满足
最大位移比	X 方向	1.05<[1.50]	满足
	Y 方向	1.45<[1.50]	满足
最大层间位移比	X 方向	1.07<[1.50]	满足
	Y 方向	1.50<[1.50]	满足

根据《高规》3.4.5 条，本工程竖向构件最大的水平位移和层间位移与该楼层的平均值的比值，均小于 1.50，满足要求。

根据《抗规》3.5.2 条规定，在风荷载或多遇地震标准值作用下，按弹性方法计算的楼层层间最大水平位移与层高之比不宜大于 1/250，满足要求。

4.3 构件强度验算分析

对于设备钢平台，框架-支撑结构，考虑到工艺前期管道布置、设备重量及附属荷载提的不是很准确，一般钢柱应力比控制在 0.5 左右，主梁应力比控制在 0.6 左右，次梁应力比控制在 0.7 左右，支撑一般受长细比控制。防止后期不确定因素导致的荷载增大，从而使梁柱应力比超限。而且事实证明，后期管道连接处的阀门、操作平台及管线支撑等荷载对框架梁柱的承载力均有不同程度的影响。

表 3 杆件应力比

杆件类型	钢柱	主梁	次梁	斜杆
最大应力比	0.43	0.67	0.74	0.18

根据《高钢规》和《钢标》规定，钢柱强度、平面内稳

定及平面外稳定系数均小于 1.0, 满足规范要求。钢梁抗弯强度、平面外稳定及抗剪强度系数均小于 1.0, 也均满足规范要求。

从上述结构计算主要指标综合分析可知, 钢框架结构周期、位移及应力比等主要指标均满足规范要求。根据总体设计稳定性指标, 应对钢框架薄弱位置进行加强构造措施, 确保钢框架总体设计满足安全、可靠性要求。

5 结语

1) 对于平、立面不规则的设备承重钢平台, 应采用钢框架-支撑结构, 且高宽比超限的单榀框架, 应在主轴两个方向沿立面设连续竖向支撑。

2) 采用 PKPM 中 SATWE 计算建模, 可只关注周期、位移计算结果, 以及梁柱强度验算、轴压比及挠度等计算结果, 是否满足规范限制要求。对于本身平立面结构布置均不规则的钢框架, 再加上无楼板约束, 可以忽略平立面刚度突变、刚重比和剪重比等指标。

3) 对于平台梁上有设备, 考虑水平荷载作用, 钢梁双向受弯, PKPM 中 SATWE 只能计算钢梁的平面内受力, 无

法计算平面外受力, 这时需要采用手算复核钢梁平面外稳定, 或采用有限元软件校核。

4) 对于工业设备钢平台, 框架-支撑结构, 一般钢柱应力比控制在 0.5, 主梁应力比控制在 0.6, 主梁应力比控制在 0.7, 支撑一般受长细比控制。

参考文献:

【1】GB50017-2017, 钢结构设计标准[S].

【2】GB50135-2006, 高耸结构设计规范[S].

【3】余勇为等, 中心支撑对钢框架结构体系抗震性能影响分析, 四川建筑, 2009 年 03 期.

【4】王祯. 钢框架-中心支撑结构体系设计浅析. 工程建设与设计, 2011 年 06 期.

【5】哈敏强, 几种钢框架-支撑结构体系的特点和性能. 住宅科技, 2004 年第 3 期.

作者简介: 闵祥兵(1983-), 男, 安徽蚌埠人, 工程师, 2011 年毕业于西安建筑科技大学结构工程专业, 硕士, 现从事石油天然气地面工程建设的结构设计工作。