

某砌体与钢筋混凝土框架混合结构承载力分析和加固设计

肖扬

中国建筑科学研究院有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000

摘 要 : 本文对某建于1992年的三层厂房(砌体与钢筋混凝土框架混合结构)进行了抗震承载力分析及加固设计。因常规设计软件无法对砌体与钢筋混凝土框架混合结构进行分析,本工程采用砌体墙刚度折算的方式进行复核计算。经计算,该厂房底层砌体墙结构抗震承载力不满足7度设防要求,底层框架中柱计算承载力不满足安全使用要求,需进行进一步的加固处理。利用混凝土面层加固法加固砖墙,使其在受力性能上更加接近于混凝土剪力墙,从而将原混合结构近似改造成框架剪力墙结构体系。

关 键 词 : 框架; 砌体; 混合结构; 刚度折算; 承载力分析; 加固设计

Analysis of Bearing Capacity and Reinforcement Design of a Mixed Structure of Masonry and Reinforced Concrete Frame

Xiao Yang

Shenzhen Branch of China Building Research Institute, Shenzhen, Guangdong 518000

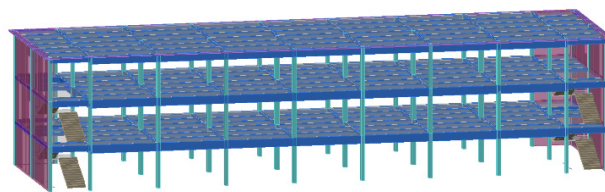
Abstract : This paper analyzes the seismic bearing capacity and reinforcement design of a three-story workshop (masonry and reinforced concrete frame mixed structure) built in 1992. Because the conventional design software cannot analyze the mixed structure of masonry and reinforced concrete frame, the project adopts the masonry wall stiffness conversion method for review and calculation. According to the calculation, the seismic bearing capacity of the bottom masonry wall structure of the workshop does not meet the requirements of 7 degrees of fortification, and the calculated bearing capacity of the column in the bottom frame does not meet the requirements of safe use, so further reinforcement is needed. The concrete surface layer reinforcement method to reinforce the brick wall is closer to the concrete shear wall in the stress performance, so that the original mixed structure is roughly transformed into the frame shear wall structure system.

Keywords : frame; masonry; mixed structure; stiffness conversion; analysis of bearing capacity ; reinforcement design

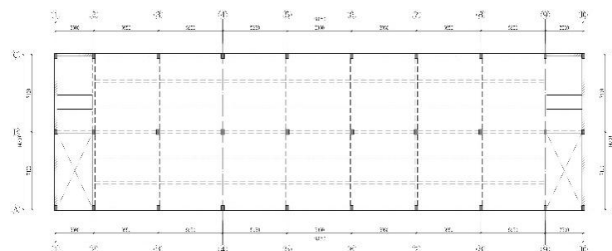
一、工程概况

某厂房建筑建成于1992年,地上三层,建筑高度约11.7m,建筑面积约1550m²,为砌体与钢筋混凝土框架混合结构。根据现场实测,平面1-A-C、1-2-C、10-A-C、9-10-C轴为通高的烧结普通砖墙,墙厚为240mm;一至三层砖墙抗压强度推定值为MU15,砌筑砂浆强度推定值为2.5MPa。除上述位置外,结构平面其余区域均为钢筋混凝土框架结构,框架柱截面为350x500、300x400,框架梁截面以250x700、200x450为主;一至三层框架柱强度推定值为C18,二至屋面层框架梁强度推定值为C16。建筑楼层盖为现浇钢筋混凝土楼板,各层板厚推定值均为100mm。实测建筑一至三层层高均为3.9m,建筑高度11.7m。

本工程按7度抗震设防考虑地震作用,抗震设防类别为丙类,设计基本地震加速度0.1g,Ⅱ类场地,按现行规范进行抗震分析。



> 图1 某厂房三维模型示意



> 图2 某厂房结构平面示意

作者简介: 肖扬(1997.08-),男,汉族,籍贯:广东省,本科,初级,从事建筑结构方面研究。

二、原结构承载力验算

2 ~ 3 层楼面恒荷载取 1.0kN/m²，楼面活荷载取 3.5kN/m²。屋面恒荷载取 3.0kN/m²，不上人屋面活荷载取 0.5kN/m²。根据《砌体结构设计规范》（GB50003-2011，以下简称砌规）3.2.5 的规定，砌体弹性模量取 2224MPa。

因常规设计软件无法对砌体与钢筋混凝土框架混合结构进行分析，本工程采用砌体墙刚度折算的方式进行复核计算。具体是将砌体部分的砖墙近似按照抗弯刚度等效原则、自重等效原则折算为混凝土墙。在等效过程中，将砌体部分的砖墙近似按照抗剪刚度等效原则折算为混凝土墙时，由于砌体和混凝土的切变模量均为各自相应弹性模量的 0.4 倍，故得到的结果与按抗弯刚度等效相同。等效之后的剪力墙与原砖墙在自重上有较大差别，为将等效模型更接近原模型，将等效前后的墙体自重差异换算为墙间荷载。

根据《混凝土结构设计规范》（2015 年版）（GB50010-2010，以下简称混规）表 4.1.5，C20 混凝土的弹性模量 E_c=25500MPa，根据《砌规》附录 B 表 B.0.1-1，砌体抗压强度 $f_m = k_1 f_1^a (1 + 0.07 f_2) k_2 = 3.5 \text{MPa}$ 。表 1 列出砖墙按刚度等效等代为混凝土墙的过程和结果。

表 1 砖墙墙厚等效

砖实测抗压强度平均值 (MPa)	砂浆抗压强度平均值 (MPa)	砌体抗压强度 (MPa)	砖弹性模量 (MPa)	砖墙厚度 (mm)	混凝土弹性模量 (MPa)	等效后混凝土墙厚度 (mm)
15.0	2.5	3.5	2224	240	25500	21

原有砖墙等效替代为混凝土墙后，两者之间的自重差值通过在混凝土墙上布置对应的线荷载，以保证等代前后墙体荷载的一致。

对应的线荷载值： $Q_L = 0.24 \times 8 \times 3.9 - 0.021 \times 25 \times 3.9 = 14.8 \text{ kN/m}$ 原有砖墙等代为混凝土墙后，按框剪结构在 PKPM 软件中进行建模计算，并在 SATWE 程序中进行结构内力分析。砌体承重墙部分，根据计算出的不利内力，按砖混结构的计算公式验算砌体承重墙的高厚比、受压承载力和抗震承载力；框架部分则根据 SATWE 程序验算柱、梁、板的计算承载力是否满足要求。

经复核计算，结构底层砌体承重墙 1-A-C、10-A-C 的高厚比、受压承载力计算满足安全使用要求，抗震承载力计算不满足安全使用要求；其余砖墙计算承载力均满足安全使用要求。根据 SATWE 计算结果，首层框架中柱计算承载力不满足安全使用要求，其余框架柱、梁构件计算承载力满足安全使用要求。

（1）砖墙承载力验算

以底层承重墙 1-A-C 为例，展示计算复核过程。

①高厚比验算

根据砌规 5.1.3 条：计算高度 $H_0 = 1.0H = 1.0 \times 3900 = 3900 \text{mm}$

根据砌规 6.1.3 条：承重墙取 $\mu_1 = 1.00$ ，无门窗洞口取 $\mu_2 = 1.00$

根据砌规 6.1.1 条：允许高厚比 $[\beta] = 22.00$

$\beta = H_0/h = 3900 \div 240 = 16.25 \leq \mu_1 \mu_2 [\beta] = 1.00 \times 22.00 = 22.00$ ，满足

②受压承载力验算

高厚比计算得 $\beta = 16.25$

根据砌规 D.0.1 条：由砂浆强度等级得， $\alpha = 0.002$

$\beta = 16.25 > 3$ 时， $\phi = \phi_0 = \frac{1}{1 + \alpha \beta^2} = \frac{1}{1 + 0.002 \times 16.25^2} = 0.654$

抗压强度设计值调整系数：1.00

砌体抗压强度设计值： $f = 1.00 \times 1.30 = 1.30 \text{MPa}$ $b = s = 14200 \text{mm}$ ， $A = bh = 14200 \times 240 = 3408000 \text{mm}^2$ 根据 SATWE 电算结果，底层承重墙 1-A-C 压力 $N = 1211.1 \text{kN}$

根据砌规 5.1.1 条：

$N = 1211.1 \text{ kN} \leq \phi f A = 0.654 \times 1.30 \times 3408000 \times 10^{-3} = 2987.5 \text{ kN}$ ，满足

③抗震承载力验算

根据《建筑抗震设计规范》（2016 年版，GB50011-2010，以下简称抗规），嵌砌于框架之间的普通砖墙，其抗震受剪承载力可按式计算：

$$V \leq \frac{1}{\gamma_{REc}} \sum (M_{yc}^u + M_{yc}^l) / H_0 + \frac{1}{\gamma_{REw}} \sum f_{vE} A_{w0}$$

式中：V——嵌砌普通砖墙或小砌块墙及两端框架柱剪力设计值；

A_{w0} ——砖墙或小砌块墙水平截面的计算面积，无洞口时取实际截面的 1.25 倍

$M_{yc}^u + M_{yc}^l$ ——M、M 分别为底层框架柱上下端的正截面受弯承载力设计值

H_0 ——底层框架柱的计算高度，两侧均有砌体墙时取柱净高的 2/3，其余情况取柱净高

γ_{REc} ——底层框架柱承载力抗震调整系数，可采用 0.8

γ_{REw} ——嵌砌普通砖墙或小砌块墙承载力抗震调整系数，可采用 0.9

f_{vE} ——砖砌体沿阶梯形截面破坏的抗震抗剪强度设计值

底层承重墙 1-A-C 构件按上式计算得到的抗震受剪承载力小于剪力值，说明该墙体的抗震承载力不满足 7 度抗震设防要求。

（2）混凝土构件承载力验算

以砖墙按刚度等效之后等代为混凝土墙的结构计算模型，采用 PKPMV1.5 结构计算软件做计算分析，读取 SATWE 构件配筋计算结果，与检测报告中构件配筋实测规格做对比复核验算。

以一层框架柱、二层框架梁为例，展示复核过程。以下为摘录的部分复核结果。

表 2 框架柱钢筋配置及保护层厚度抽检结果（摘录）

层数	构件名称	受力主筋配置（B 向 / H 向）		箍筋直径 间距 (mm)	加密区 非加密区		备注
		设计值	实测值		设计值	实测值	
1 层	7/B	/	3B22/3B22	/	A10@105/198(3)		开凿验证
1 层	8/A	/	3B18/3B18	/	A10@103/190(3)		开凿验证

层数	构件名称	受力主筋配置 (B向/H向)		箍筋直径 间距 (mm)	加密区 非加密区	备注
		设计值	实测值	设计值	实测值	
1层	8/C	/	3B18/3B18	/	A10@85/188(3)	开凿验证
注 钢筋实测值中, A表示 HPB235钢筋, B表示 HRB335钢筋						

表3 框架梁钢筋配置及保护层厚度抽检结果 (摘录)

层数	构件名称	跨中梁底主筋		箍筋直径 间距 (mm)	加密区 非加密区	备注
		设计值	实测值 (底筋)	设计值	实测值	
2层	B/3 ~ 4	/	2B20	/	A8@101/203(2)	开凿验证
2层	4/B ~ C	/	4B25	/	A8@109/187(2)	开凿验证
2层	A/6 ~ 7	/	2B20	/	A8@97/206(2)	开凿验证
注 钢筋实测值中, A表示 HPB235钢筋, B表示 HRB335钢筋						

表4 框架柱承载力及轴压比验算结果 (摘录)

构件		满足计算及构造 要求 所需配筋 (B向/H向)		实测配筋		轴压比		验算 结果
		纵筋 (mm ²)	箍筋 (mm ² / 100mm)	纵筋 (mm ²)	箍筋 (mm ² / 100mm)	计算值	限值	
1层	7/B	773/ 908	278/0	1140/ 1140	222/118	0.92	0.90	不满足
1层	8/A	598/ 445	177/0	763/ 763	227/123	0.71	0.90	满足
1层	8/C	548/ 445	177/0	763/ 763	275/124	0.70	0.90	满足

表5 框架梁承载力及轴压比验算结果 (摘录)

构件		满足计算及构造 要求所需配筋		实测配筋		验算 结果
		跨中底筋 (mm ²)	箍筋 (mm ² / 100mm)	跨中底筋 (mm ²)	箍筋 (mm ² / 100mm)	
2层	B/3 ~ 4	537	25/21	628	99/49	满足
2层	4/B ~ C	1526	94/76	1963	92/53	满足
2层	A/6 ~ 7	507	30/21	628	103/49	满足

经验算复核, 首层框架中柱计算承载力不满足安全使用要求, 其余框架柱、梁等构件计算承载力满足安全使用要求。

(3) 结构整体指标分析

以砖墙按刚度等效之后等代为混凝土墙的结构计算模型, 采用 PKPMV1.5 结构计算软件做计算分析。SATWE 计算结果表明结构各项整体指标满足现行规范要求, 以下为部分摘录结果。

表6 位移角指标计算结果摘录

X 向地震工况的位移			Y 向地震工况的位移		
层号	最大层间位移 (mm)	最大层间位移角	层号	最大层间位移 (mm)	最大层间位移角
3	2.82	1/1346	3	0.61	1/6202
2	3.59	1/1087	2	0.88	1/4447
1	3.14	1/1243	1	0.89	1/4383

三、加固设计

针对上述问题, 对底层砌体承重墙采取外加钢筋混凝土面层的方式进行加固处理。利用混凝土面层加固法加固砖墙, 使其在受力性能上更加接近于混凝土剪力墙, 从而将原混合结构近似造成框架剪力墙结构体系。

在 PKPM 中修改加固前模型, 并在 SATWE 程序中进行结构内力分析, 利用计算出的不利内力, 再按照砖混结构的计算工程验算墙体的受压承载力、高厚比和抗震承载力。经过验算, 砌体承重墙 1-A-C、10-A-C 加固后计算承载力满足安全使用要求。

对于该结构, 为减少对建筑外立面的影响, 拟在边跨砖墙内侧单面增加钢筋混凝土面层的方式进行加固处理。混凝土强度等级为 C30, 单面厚 100mm, 配筋为双向 C12@200, 板墙采用 C8 的 S 形穿墙筋与原墙体连接, 穿墙筋呈梅花状布置, 间距为 600mm, 在板墙两端沿墙高每隔 600mm 各设 1 根 C22 的拉结钢筋, 其一端锚固在端部原有的墙体内, 另一端锚入板墙内。板墙上下应与楼、屋盖可靠连接, 至少应每隔 1m 设置穿过楼板且与竖向钢筋等面积的短筋, 短筋两端应分别锚入上下层的板墙内, 其锚长度不应小于短筋直径的 40 倍, 为避免穿板钢筋过密, 造成楼板过大的损伤, 采用等代面积集中配筋穿过楼板的方式, 穿板钢筋采用 C22@600, 上下搭接, 楼板钻孔时尚不应损伤原有钢筋。新增钢筋混凝土面层应延伸至原砖墙基础顶面, 地下部分面厚度扩大为 200mm。

对底层框架中柱, 采取外包型钢的方式进行加固处理。这种方式施工简单, 对建筑室内的影响较小, 且能增强混凝土柱的抗压和抗弯能力。

加固设计完成后, 需重新进行抗震承载力验算, 保证结构安全。加固施工完成后, 尚需加强日常维护管理。建筑结构的日常维护管理对于延长结构使用寿命至关重要。建议定期清理墙体表面的灰尘和杂物, 防止墙体因长期积灰而受潮、腐蚀。同时, 注意避免在墙体上随意开凿孔洞或安装设备, 以免影响墙体的完整性。对于厂房内的生产设备, 应合理布置, 避免对墙体产生过大的局部荷载, 确保墙体在正常使用条件下的安全性和稳定性。

四、结论

对于钢筋混凝土框架混合结构进行分析, 本工程采用砌体墙刚度折算的方式进行复核计算, 将砌体部分的砖墙近似按照抗弯刚度等效原则、自重等效原则折算为混凝土墙。按上述方式进行建模计算, 提取最不利内力进行砌体承重墙承载力验算, 根据 SATWE 计算结果复核混凝土柱、梁等构件的计算承载力, 以求计算结果更加真实可靠。

对于此类体系不合理、传力不明确的结构, 应充分结合原结构的实际情况, 选择合理的加固措施。利用混凝土面层加固法加

固砖墙，使其在受力性能上更加接近于混凝土剪力墙，从而将原混合结构近似改造成框架剪力墙结构体系，使加固后的结构形式更加合理。

结构加固过程中，应尽量减少对原有结构或构件的拆除或损伤，对施工中可能导致的倾斜、开裂或局部倒塌等现象，应预先

采取安全措施。加固施工过程中，应加强对现状结构的巡查工作，发现与检测报告不符或检测鉴定时未发现的结构缺陷和损伤，应及时采取措施消除隐患，最大限度的保证加固的效果和结构的可靠性。加固完成后，应加强对建筑物的日常巡查和维护。

参考文献

[1].GB50010-2010 混凝土结构设计规范（2015版）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.

[2].GB50011-2010 建筑抗震设计规范（2016年版）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2016.

[3].GB50003-2011 砌体结构设计规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[4] 郭红秋.既有混凝土—砌体混合结构的抗震加固方法研究 [J].中国海洋大学，2012.DOI:10.7666/d.y2158428.

[5] 郑士举.砌体与钢筋混凝土框架平面混合结构抗震性能评估及加固方法研究 [J].四川建筑科学研究，2018(002):044..