

某砖混结构砖砌体墙 UHPC 抗震加固设计与分析

陈伟恩

(福建省建筑设计研究院有限公司,福建 福州 350000)

摘要: 某既有砖混结构住宅楼经过鉴定,墙体普遍竖向承载力及抗震承载力不满足要求,必须进行墙体加固。依据现有加固规范及加固方法,对比分析了砖砌体墙抗震加固方法的适用性,得出 UHPC 面层加固法显著提高墙体的承载能力和变形性能。通过提出具有抹面工作性的 UHPC 配合比,进行了墙体面层加固设计,并阐述 UHPC 加固砖砌体墙的施工步骤及避免墙体剥离的加固构造措施。结果表明,加固后砖墙的受压及抗震承载力能够达到设计要求且减少上部墙体自重。

关键词: 砖混结构;砖砌体墙;抗震加固;UHPC 加固

中图分类号: TU746.3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)06—0128—05

UHPC Seismic Reinforcement Design and Analysis of a Brick-concrete Structure Brick Wall

CHEN Weien

(Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China)

Abstract: An existing brick concrete structure residential building has been identified. The result shows that the vertical bearing capacity and seismic bearing capacity of the wall cannot meet the requirements, so the wall must be strengthened. According to the existing reinforcement codes and methods, the applicability of seismic reinforcement methods of brick masonry wall is compared and analyzed, and it is concluded that UHPC surface reinforcement method can significantly improve the bearing capacity and deformation performance of the wall. By proposing the UHPC mix proportion with plastering workability, the wall surface reinforcement design is carried out, and the construction steps of UHPC strengthening brick masonry wall and the reinforcement structural measures to avoid wall peeling are described. The results show that the compression and seismic bearing capacity of the strengthened brick wall can meet the design requirements and reduce the dead weight of the upper wall.

Keywords: brick concrete structure; brick masonry wall; seismic reinforcement; UHPC reinforcement

我国大量砖混结构建造年代久远且抗震设防标准低,加上服役年限增长及外部环境造成结构损伤,造成墙体竖向承载力和抗剪承载力不满足要求,地震作用下易导致主体结构的破坏甚至倒塌^[1]。因此,砌体结构的抗震加固研究长期以来备受关注。

传统结构加固方法有钢筋混凝土面层加固法、外包型钢加固法、粘贴纤维复合材加固法及钢丝绳网-聚合物改性水泥砂浆面层加固法等^[2]。另外,研究人员也提出了新型加固方法,包括高延性纤维增强水泥基复合材料面层加固法、体外预应力加固

法及砂浆置换法等^[3]。其方法各异且对墙体的加固效果不尽相同。

新发展的超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)是根据最大堆积密实度理论制备而成的低水胶比纤维水泥基复合材料,具备超高的强度和优异的耐久性能^[4-5],在结构加固应用中日趋广泛。近年来, UHPC 加固砖砌体墙的应用得到关注^[6-8]。郑七振等^[6]、房明超等^[7]研究 UHPC 面层加固及钢筋网聚合物砂浆加固对低强度砖墙抗震性能的影响,试验表明,两者都能有效提高墙

体抗震性能,UHPC 面层加固在提高墙体开裂荷载、极限荷载及刚度和耗能上优于钢筋网聚合物砂浆加固法。在此基础上,位三栋等^[8]对低强度受损砖墙采用 UHPC 加固,试验结果表明 UHPC 加固受损墙体的水平承载力较未加固完整墙体提高了 108%,加固面层与墙体能较好的协同工作。孙志杨等^[9]通过 UHPC 加固低强度砖墙试验结果与有限元对比分析,验证了 UHPC 面层加固低强度砖砌体具有可行性。

综上所述,UHPC 加固砖砌体墙能有效的提高墙体的竖向承载力及抗震性能,但目前 UHPC 加固砌体墙多为支模浇筑,不易控制浇筑过程中的施工质量,对于抹墙型 UHPC(触变性 UHPC)的加固研究较少,因此有必要开展抹墙型 UHPC 的制备及其对砌体墙的加固。本文通过工程实例,综合考虑砖砌体墙存在的问题,采取 UHPC 面层加固方案,制备出具有抹面施工性的 UHPC 配合比,采用抗震承载力算法对加固后墙体进行抗震分析及计算,给同类工程加固设计提供参考。

1 工程概况

福州市某五层砖混结构住宅楼,房屋总高度为 15.6 m,标准层层高 3 m,建筑面积约为 2 200 m²,20 世纪 70 年代建成并投入使用,房屋外立面如图 1 所示。上部结构采用 180 mm 及 240 mm 厚烧结普通砖墙且纵横墙双向承重且平面布置对称,楼板、屋盖为现浇钢筋混凝土结构,立面布置规则合理,且质量和刚度沿高度分布规则均匀,图 2 为建筑标准层平面布置图。建筑抗震设防类别为丙类,抗震设防烈度 7 度,根据《建筑抗震鉴定标准》规定,后续使用年限按 30 a 考虑,属 A 类建筑^[10]。



图 1 房屋外立面图

工程检测表明:

(1) 结构整体性检测。各层楼、屋盖处均设置钢筋混凝土圈梁,但房屋外墙及楼梯间四角未设置构造柱。

(2) 墙体构造检查。卫生间、阳台填充墙及承重墙与纵横墙无可靠连接;承重墙体的门窗间墙宽

度及外墙尽端至门窗洞边的距离超过最小限值 800 mm 的要求。

(3) 墙体工作状态检查。砖墙表面存在孔洞,灰缝砂浆饱满度不足,部分承重墙开裂渗水,如图 3 所示。另外,根据砌筑砂浆抗压强度贯入法及砖抗压强度回弹法进行实测,砌筑砂浆抗压强度值为 1.1 MPa。砖抗压强度等级为 MU10。

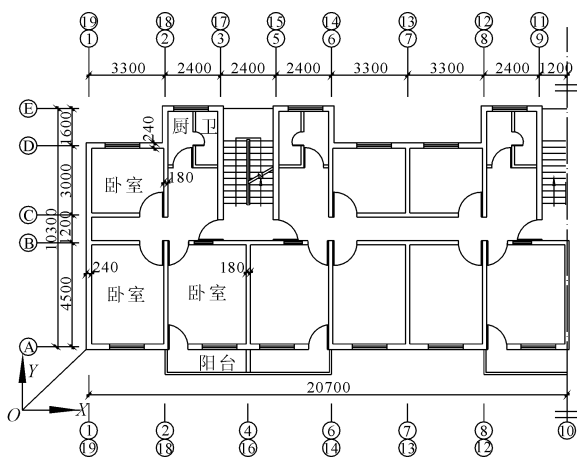
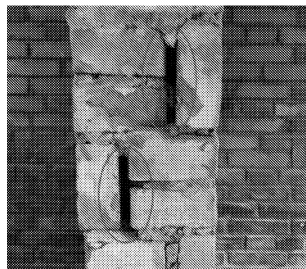


图 2 标准层平面图(单位:mm)



(a) 墙体无可靠搭接



(b) 墙体竖缝砂浆不饱满



(c) 墙体裂缝

图 3 墙体缺陷图

2 原结构承载力复核

2.1 受压承载力评估

根据实测的砂浆强度对结构进行核算(MU10, M1.1),多数一层、部分二层及个别三层墙体受压承载力已不满足《砌体结构设计规范》^[11](GB 50003—2011)要求。结构首层墙体竖向承载力计算结果如图4所示。

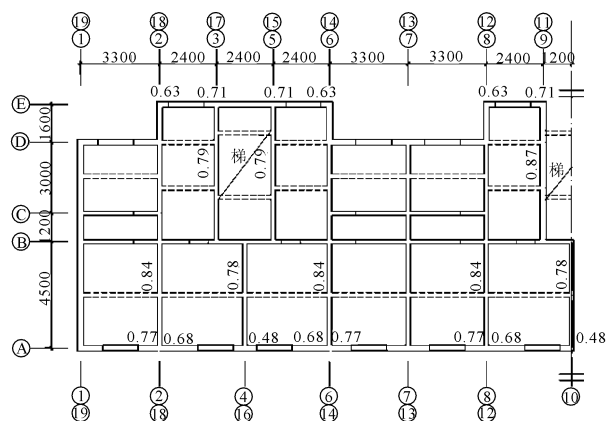


图4 一层墙体受压承载力汇总表(单位:mm)

2.2 抗震性能评估

根据《建筑抗震鉴定标准》^[12](GB 50023—2009)得到原结构不满足第一级鉴定抗震鉴定,采用楼层综合抗震能力指数验算进行第二级鉴定,依据抗震鉴定标准中式(5.2.14),结果如表1所示。由表1可知,在7度(0.10g)小震作用下,一至四层纵横向综合抗震能力指数不满足规范要求,其中纵向墙体的综合抗震能力指数大于横向。因此,墙体应采取加固措施,从而提高纵横墙的整体性、受压及抗震承载力。

表1 楼层综合抗震能力指数验算结果汇总表

楼层	体系影响系数		局部影响系数		综合抗震能力指数	
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
1	1.00	1.00	0.90	0.90	0.98	0.67
2	1.00	1.00	0.90	0.90	0.92	0.63
3	1.00	1.00	0.90	0.90	0.93	0.62
4	1.00	1.00	0.90	0.90	0.99	0.66
5	1.00	1.00	0.90	0.90	1.86	1.09

3 加固方案确定

3.1 加固方案对比

住宅楼砌体墙的抗震加固依据抗震鉴定的结论,根据房屋使用情况、加固改造复杂程度及施工过

程中的安全隐患,选择具有提升性能明显、原结构损伤小、施工便捷及经济合理等优点的加固方法。此外,在本工程基础不加固的情况下,避免选择自重较大的加固方式。

《砌体结构加固设计规范》^[13](GB 50702—2011)及《建筑抗震加固技术规程》^[14](JGJ 116—2009)中常用的砖砌体墙加固方法有:钢筋混凝土面层加固法、板墙加固法及钢丝绳网-聚合物改性水泥砂浆面层加固法等^[15-16]。钢丝绳网水泥砂浆面层加固法及板墙加固存在加固材料的强度低、耐久性差及加固厚度较大,占用室内空间且增加了结构自重,一定程度增大了地震作用。另外,抗震加固规程规定,板墙加固中原有砌体墙砂浆强度等级不小于M2.5,且未提供低强度砂浆墙体的增强系数。

针对传统砖砌体结构加固方式存在的不足,研究人员提出了不同的加固方法^[3,13,17]。高延性纤维增强水泥基复合材料面层加固砖砌体墙,能较好提升结构的延性,但承载力提升有限且加固成本高。体外预应力加固砖砌体墙能有效消除或减缓后增杆件的应力滞后现象,但施工较繁琐且可能对结构造成二次损伤。砂浆置换法采用高性能砂浆置换,形成新旧两种材料组合的砌体结构,达到提高砌体结构抗震性能的目的,但不适用于砖或砌块材料老化的结构。已有研究表明,UHPC面层加固采用较小加固厚度能显著提升墙体整体性能,避免了原始墙体的扰动损伤,能较好的适用于本工程的情况。

3.2 UHPC 加固

UHPC面层加固是在砌体墙增设加固面层,形成“砖砌体-UHPC”组合墙体,达到提高墙体承载能力及耗能能力,且最大限度的减少上部墙体自重,避免了地震作用的增大^[2,10,16]。

已有研究采用摸墙型UHPC,其不仅可以避免支模浇筑,还可以减少振捣不当时出现的脱粘及空洞问题。本项目采用摸墙型UHPC,通过POM纤维替换钢纤维,减少钢纤维在触变性UHPC中的聚团,制备出具有良好施工性、优异力学性能和耐久性的UHPC。

抹墙型UHPC加固法与传统的钢筋网砂浆(聚合物砂浆)面层加固法相比,UHPC加固砖砌体具有如下优势:

(1) 不破坏原结构的整体性。无需在墙体钻孔和绑扎钢筋,避免对原结构的整体性的破坏。

(2) UHPC加固效果好于钢筋网聚合物砂浆加固。已有相关试验表明,UHPC面层加固在提高墙

体开裂荷载、极限荷载及刚度和耗能上优于钢筋网聚合物砂浆加固法。

(3) 施工简单,工期短。构造措施简单,抹面一次完成,施工质量得到保证,工期比传统加固方法短。

(4) 造价低。UHPC 采用 20 mm ~ 40 mm 厚的加固面层,造价比传统加固方式低。

4 墙体抗震加固设计与分析

4.1 材料制备及力学性能测试

试验选用福建省某材料公司生产的 UHPC 预混料。预混料所采用的原材料如下(相关数据由供应商提供):普通硅酸盐水泥 P. O 42.5;微硅粉;600 目石灰石粉;石英砂由三种不同粒径组成,分别为 400 目、70 目 ~ 140 目及 40 目 ~ 70 目,具体配合比见表 2。在预混料中加入聚羧酸高效减水剂、触变剂及 POM 纤维,降低了传统 UHPC 的流动性,增强其可塑性和黏度,实现 UHPC 的抹面工作性能,改性后的 POM-UHPC 强度有所降低,但不影响加固效果。UHPC 力学性能试验按照《超高性能混凝土(UHPC)技术要求》^[18](T/CECS 10107—2020)及《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[19](GB/T 50081—2019)有关要求进行。UHPC 的力学性能如表 3 所示。

表 2 UHPC 配合比

材料	胶凝材料	石英砂	POM 纤维	减水剂	水
用量/(kg · m ⁻³)	1400	830	28.2	28	203

表 3 UHPC 力学性能

龄期/d	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
7	49.6	9.8
28	89.3	11.7
56	102.3	12.4

4.2 墙体面层加固设计

参考文献[6-7],初步确定一层至五层的外墙采用 20 mm 厚的 UHPC 单面加固,内墙为 25 mm 厚的 UHPC 双面加固。按照《砌体结构加固设计规范》及《砌体结构设计规范》相关章节进行试算及调整。其中,普通砖墙体截面抗震加固后竖向承载力按式(1)计算:

$$N = \varphi_{\text{con}} (f_{\text{m0}} A_{\text{m0}} + \alpha_c f_c A_c) \quad (1)$$

式中: N 为构件加固后的轴心压力设计值; φ_{con} 为轴心受压构件的稳定系数; f_{m0} 为原构件砌体抗压强度

设计值; A_{m0} 为原构件截面面积; α_c 为砂浆强度利用系数; f_c 为砂浆轴心抗压强度设计值。其中, UHPC 轴心抗压强度设计值取 $f_c = 70 \text{ MPa}$; A_c 为新增砂浆面层的截面面积。

普通砖墙体截面抗震加固后受剪承载力按式(2)验算:

$$V \leq V_{\text{ME}} + V_{\text{si}} / \gamma_{\text{RE}} \quad (2)$$

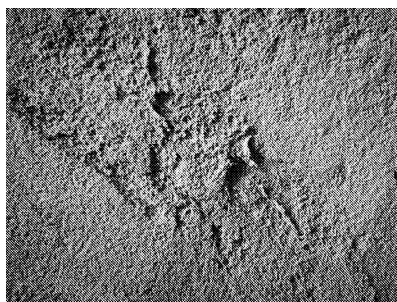
式中: V 为考虑地震组合的墙体剪力设计值; V_{ME} 为原砌体抗震受剪承载力; V_{si} 为采用 UHPC 面层加固后提高的抗震受剪承载力; γ_{RE} 为承载力抗震调整系数。经过墙体抗震加固复核算,内、外墙竖向承载力及抗震承载力均满足要求。如表 4 所示。

表 4 墙体承载力验算

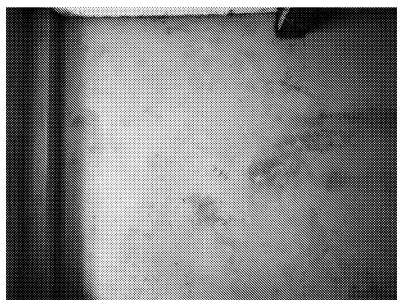
墙厚/mm	加固前受压承载力/(kN · m ⁻¹)	加固后受压承载力/(kN · m ⁻¹)	加固前抗震承载力/(kN · m ⁻¹)	加固后抗震承载力/(kN · m ⁻¹)
180(双面)	162	2173.9	5.0	82.8
240(单面)	216	949.5	7.2	38.3

5 现场施工及构造措施

UHPC 面层加固按照施工前清理砖墙表面,润湿墙面、UHPC 填补砖墙孔洞、进行 UHPC 抹面及养护五个步骤进行。自然养护条件下,在保证抹面厚度均匀且湿养护时间不应少于 7 d 时, UHPC 面层未见开裂。实际工程 UHPC 加固过程如图 5 所示。



(a) UHPC 抹面加固



(b) 面层完成及养护

图 5 UHPC 墙体加固过程

另外,为保证两种材料的粘结性,在墙上(楼板)开槽、嵌缝,将面层端部嵌入墙内(楼板)或采用 L 形倒角加强端部锚固,锚固深度为 120 mm。经过施工验收,UHPC 面层端部与墙体粘结性能好,未见剥离,其 28 d 界面钻芯拉拔强度达到 0.7 MPa ~ 1.4 MPa。

6 结 论

(1) UHPC 的性能优点克服了传统加固材料力学性能低、耐久性差等问题,加固既有墙体具有可行性。结合工程实例进行 UHPC 加固砖墙的设计及分析计算,内外墙体分别采用 20 mm 及 25 mm 厚的 UHPC 抹面加固,砖砌体 - UHPC 组合墙体竖向承载力及抗震承载力提高了 4 倍 ~ 5 倍以上。

(2) 制备出性能优异且具备墙体抹面施工性的 UHPC,为 UHPC 加固墙体提供施工便捷。通过添加触变剂,调配出易于砖砌体墙施工的 POM - UHPC,其抗压强度超过 100 MPa 且抗折强度大于 12 MPa,应用于墙体加固时免去支模及配筋的施工流程,施工简单且工期短。

(3) 通过面层端部构造措施保证 UHPC 加固砖墙的整体性。通过墙体(楼板)开槽、嵌缝,将 UHPC 面层端部嵌入墙内(楼板)或采用 L 形倒角加强端部锚固,120 mm 的锚固深度能有效防止面层端部剥离破坏。该已竣工的加固实例,给同类工程加固提供参考。

参考文献:

- [1] 张向东. 既有砖混结构墙体抗震补强加固设计[J]. 建筑结构,2016,46(9):95-99.
- [2] 李梁峰. 钢筋网水泥砂浆面层加固石墙抗剪性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):140-146.
- [3] 石建光,郑雪锋,林树枝,等. 置换砂浆强度及深度对置换砂浆加固砌体抗剪性能影响的试验研究[J]. 建筑结构,2021,51(13):126-131.
- [4] 陈宝春,季 韬,黄卿维,等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.
- [5] 陈 倩. 聚丙烯纤维和粗骨料对超高性能混凝土抗拉强度的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):113-116,199.
- [6] 郑七振,房明超,彭 斌,等. 历史建筑砌体墙加固试验抗震性能研究[J]. 工业建筑,2019,49(11):169-176.
- [7] 房明超,郑七振,龙莉波,等. UHPC 加固低强度历史建筑砖墙试验研究[J]. 中国水运,2019,19(5):242-244.
- [8] 位三栋,马跃强,彭 斌,等. 超高性能混凝土加固历史保护建筑砖砌体承重墙性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(S2):284-289.
- [9] 孙志杨,徐 州,赵雅鑫. UHPC 面层加固历史保护建筑砖砌体墙有限元分析[J]. 中国水运(下半月),2020,20(2):267-268.
- [10] 卜凡洋. MRPC 面层双面加固砌体墙抗震性能试验研究[D]. 济南:山东建筑大学,2018.
- [11] 砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [12] 建筑抗震鉴定标准:GB 50023—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [13] 砌体结构加固设计规范:GB 50702—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [14] 建筑抗震加固技术规程:JGJ 116—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [15] Yao X, Liang B, Zhang H, et al. Typical brick masonry walls reinforced with high-strength mortar and steel bars in the horizontal joints[J]. Advances in Structural Engineering, 2021(1):136943322110122.
- [16] 陈再现,杨续波. 组合材料加固砖砌体的有限元模拟方法[J]. 工程力学,2020,37(4):96-104.
- [17] 周铁钢,张再昱,邓明科,等. 不同 ECC 加固措施对空斗墙抗震性能的影响[J]. 振动与冲击,2020,39(22):248-253.
- [18] 超高性能混凝土(UHPC)技术要求:T/CECS 10107—2020[S]. 北京:中国工程标准化协会,2020.
- [19] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.