

赵祥,尚天伟,谢启芳,等.基于 ECC 的小雁塔抗震加固性能分析[J].地震工程学报,2017,39(5):829-835.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.829

ZHAO Xiang,SHANG Tianwei,XIE Qifang,et al.Performance Analysis of Small Wild Goose Pagoda Seismic Reinforcement Based on Engineered Cementitious Composite[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(5):829-835.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.829

基于 ECC 的小雁塔抗震加固性能分析^①

赵 祥¹,尚天伟¹,谢启芳¹,钱春宇²

(1.西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055; 2.机械工业勘察设计院有限公司,陕西 西安 710043)

摘要:高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)是一种高强度、高延性的新型建筑材料,在加固工程中具有广泛的应用前景。本文利用 ECC 的高延性和抗剪性,提出一种采用 ECC 面层加固小雁塔的保护方案,以提高古塔抗震性能;通过有限元软件 ANSYS 进行模拟分析,比较了小雁塔加固前后的地震响应。分析结果表明:采用 ECC 面层加固可显著增强塔身整体的延性和承载力,有效地提高塔体损伤容限,为 ECC 在古塔抗震加固的实际应用中提供借鉴,可作为古塔抗震保护的新途径。

关键词:高延性纤维增强水泥基复合材料; 砖石古塔; 抗震加固; ANSYS 有限元

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)05-0829-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.0829

Performance Analysis of Small Wild Goose Pagoda Seismic Reinforcement Based on Engineered Cementitious Composite

ZHAO Xiang¹, SHANG Tianwei¹, XIE Qifang¹, QIAN Chunyu²

(1. Institute of Civil Engineering, XI'AN Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. China JIKAN Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China)

Abstract: Engineered cementitious composite (ECC), a new type of building material possessing high strength and excellent ductility, presents wide application prospects in strengthening engineering. This thesis takes advantage of these characteristics of ECC to put forward a protection scheme using ECC surfaces to reinforce the Small Wild Goose Pagoda and improves its seismic performance of ancient pagoda. Using the finite element software ANSYS, the full size of the Small Wild Goose Pagoda is modeled via a monolithic masonry model. According to the national standard Code for Design of Masonry Structures and referencing the actual condition of the pagoda, the degree of damage to its bricks, and the multi-linear kinematic hardening model, the uniaxial stress-strain curve of the masonry is adjusted. The damage criterion of materials is further defined using five Willam-Warnke parameters. The El Centro seismic wave is selected as the ground motion input, and three levels of amplitude modulation are adopted. The maximum acceleration

① 收稿日期:2016-08-22

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51178388);陕西省教育厅专项科研项目(14JK1420);西安建筑科技大学西部建筑科技重点实验室项目(K01343);国机集团科技发展基金资助项目(13 科 192 号)

作者简介:赵 祥(1975—),男,博士,副教授,主要从事结构振动控制与智能材料研究。E-mail:441937590@qq.com。

values of the three conditions are 70, 220, and 400 gal. The seismic response of the model was analyzed using dynamic time-history analysis methods, and the maximum displacement and acceleration of each layer are extracted. The story drift is also calculated. The criteria show that the pagoda is seriously damaged to the brink of collapse when the peak earthquake acceleration is 400 gal. The earthquake response of the pagoda notably decreased after establishment of the ECC reinforcement model of the Small Wild Goose Pagoda. The analysis results demonstrated that the ECC surface layer reinforcement can significantly enhance the overall ductility and bearing capacity of the tower, effectively improving its damage tolerance. This work provides a reference for the practical application of ECC in ancient tower seismic reinforcement for earthquake protection.

Key words: engineered cementitious composite(ECC); masonry pagoda; seismic reinforcement; ANSYS finite element

0 引言

古塔在我国有着悠久的历史,是外来文化与中国传统建筑艺术相结合的典型代表,凝聚着我国古代工匠的智慧与结晶,具有重要的历史、科学和艺术价值。我国著名的古塔有西安的大雁塔、小雁塔、应县木塔、苏州虎丘塔等,其中砖石古塔由于取材方便,在我国分布较为广泛。

我国学者对砖石古塔抗震性能做了大量的研究工作:李德虎等^[1]研究了砖石古塔动力特性的测试方法,实测了部分古塔的动力特性,并据此提出了一种计算砖石古塔基本周期的公式;陈平等^[2]结合小雁塔实际构造特点,对其抗震能力进行了分析与评估;姚谦峰等^[3]对砖石古塔的加固对策进行了探讨;芦苇等^[4]研究了基础刚度对砖石古塔地震响应的影响。

以上文献对砖石类古塔进行了抗震性能分析,并提出了一系列有针对性的加固方法,在一定程度上提高了其结构承载力,改善抗震性能,满足一定的安全性与耐久性要求。但缺点也显而易见,例如施工作业时间长、增加结构自重、耐腐蚀性差、材料成本过高等。而高延性纤维增强水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)作为一种新型生态建筑材料,由于其具有较高的延展性、良好的抗剪性、施工简便、节约成本等优点,近年来逐渐被应用到砌体结构的加固当中,可显著提高结构的抗震性能和变形能力。因此,本文根据 1964 年加固整修的实测资料,应用大型有限元软件 ANSYS,建立小雁塔三维实体模型,分析结构整体抗震性能,并以此为依据,提出一种基于 ECC 材料的加固方案,为小雁塔的抗震保护提供新思路。

1 小雁塔抗震性能分析

1.1 小雁塔结构特点

小雁塔,唐宋时期称荐福寺塔,为全国文物重点保护单位,属密檐式砖塔。自建塔以来,历经 1 300 多年风雨,屡遭地震及战争等破坏。原有 15 层,现存 13 层,高 43.38 m,部分塔檐和檐角已损毁。塔身无明显沉降、倾斜,充分地体现了良好的抗震性能和合理的建筑结构。图 1 为小雁塔实图。

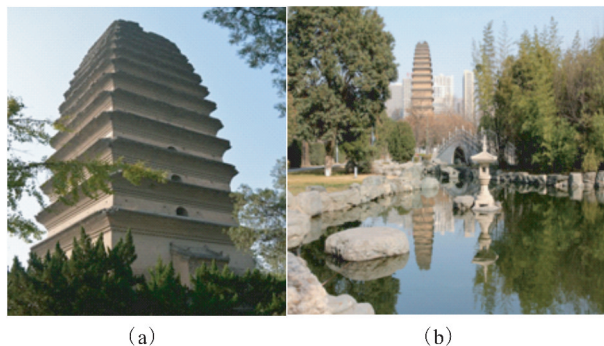


图 1 小雁塔实图

Fig.1 Small Goose Pagoda

1.2 有限元模型的建立

砌体结构作为砌块和砂浆共同作用的二相复合材料,在进行有限元分析时通常采用分离式和整体式两种模型。分离式模型考虑了砂浆与砌块之间相互作用力;整体式模型则将砂浆和砌块作为一个整体来考虑其受力性能。在本文中采用整体式模型,砌体使用 SOLID65 单元进行模拟。考虑到塔檐部分对小雁塔整体的动力特性影响有限,故在建模过程中不予考虑。塔基下部为地宫,埋置深度较大,塔体在地面的转动不大,将塔底的边界约束近似为固结来进行计算。计算模型如图 2 所示。

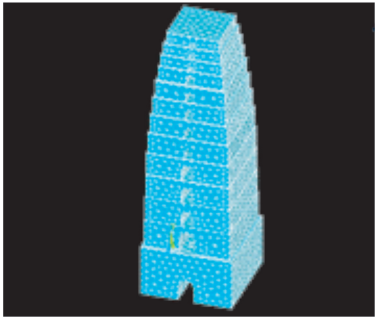


图 2 有限元计算模型
Fig.2 Finite element model

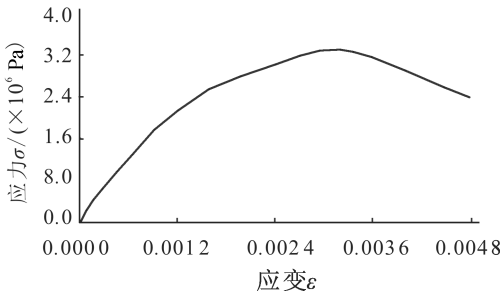


图 3 ANSYS 中砌体受压应力-应变曲线
Fig.3 The ANSYS masonry compressive stress-strain curve

屈服准则使用 Concrete 材料破坏准则,并结合多线性随动强化模型(MKIN)定义砌体的单轴应力-应变曲线。材料参数为:砌体密度 $\rho=1\,900\text{ kg/m}^3$,弹线模量 $E=1\,586\text{ MPa}$,泊松比 $\mu=0.15$,单轴抗压强度为 3 MPa ,单轴抗拉强度为 0.3 MPa 。Concrete 材料属性表用于确定材料的强度准则,受拉失效由最大拉应力准则确定,三向受压时采用 Willam-Warnke 五参数失效准则^[5],屈服面由 f_t 、 f_c 、 f_{cb} 、 f_1 和 f_2 等 5 个参数表述。此外,还有 3 个参数可以反映材料开裂后的状态:裂缝张开时,剪力传递系数取 0.4;裂缝闭合时,剪力传递系数取 0.9;拉应力释放量乘子 T_c 取 0.6,单元开裂后垂直于开裂方向的拉应力可缓慢释放,有助于数值计算的收敛。砌体的单轴受压应力-应变曲线采用施楚贤所提公式^[6],其中砌体抗压强度平均值 f_m 根据《砌体结构设计规范》(GB50003-2011)^[7] 进行计算,所需取值根据小雁塔实测资料进行相应调整,应力应变曲线见图 3。

1.3 地震时程反应分析

本文选取 EI-Centro 波作为地震动输入,该地震波最大加速度峰值为 341.7 cm/s^2 ,特征周期为 0.55 s ,场地类别为 II 类,相当于 7.1 级地震。此次时程分析选取了地震波前 30 s,时间间隔取 0.02 s ,采样点数为 1 500 个点,并基于建筑抗震规范取三

个水准(小震、中震、大震)对波进行调幅,使其最大加速度峰值分别为 70 cm/s^2 、 220 cm/s^2 、 400 cm/s^2 。对小雁塔有限元模型进行地震时程反应分析,结果如图 4 所示,表示在三个地震水准下结构各层最大加速度和各层最大位移。

由图 4 可以看出:在地震作用下,小雁塔各层最大加速度和位移随楼层增加而增大。在最大加速度反应方面:在 9 层以上加速度为线性增长,而 9 层以下加速度会出现减小现象,而且在小震和中震作用下各层间加速度增长值较大,而在大震时各层间加速度增长值较小。在最大位移反应方面:在三种地震工况下,各层最大位移都表现为线性增长。在小震和中震作用下各层间位移增长较快,而在大震时,由于混凝土楼板的存在增大了小雁塔整体水平刚度,使得层间位移增长较慢,改善了结构在大震作用下的抗震性能。

表 1 地震作用下塔身各层的最大层间位移角

Table 1 The biggest displacement angle between the layers under the earthquake

层数	El-Centro 波		
	小震(70 gal)	中震(220 gal)	大震(400 gal)
13 层			
12 层	1/1942	1/529	1/323
11 层	1/2096	1/564	1/322
10 层	1/2121	1/409	1/206
9 层	1/1971	1/794	1/606
8 层	1/2139	1/569	1/339
7 层	1/2182	1/537	1/358
6 层	1/2221	1/386	1/240
5 层	1/2451	1/1168	1/760
4 层	1/2823	1/625	1/400
3 层	1/4330	1/2579	1/1353
2 层	1/8721	1/1804	1/958
1 层			

表 2 砖石古塔破坏状态的判断准则(位移准则)

Table 2 Masonry pagodas damage state judgment criterion (displacement criterion)

计算所得层间位移角	结构所处状态	结构破坏程度
$\leq 1/565$	弹性阶段	结构完好
$1/565 \sim 1/360$	弹性阶段进入屈服阶段	结构轻微破坏
$1/360 \sim 1/260$	屈服阶段进入刚度退化阶段	结构中等级破坏
$\geq 1/260$	层间位移角超过极限值	结构严重破坏甚至倒塌

由位移准则^[8](表 2)结合表 1 数据可以判断:在地震加速度输入峰值为 70 gal 时,塔体本身的最大层间位移角出现在第 10 层,大小为 1/2628,小于 1/565,由此可判断在小震时塔体均处于弹性范围内,无破坏风险;在加速度输入峰值为 220 gal 时,层间位移角较大值出现在第 6 层与第 10 层,其值分别

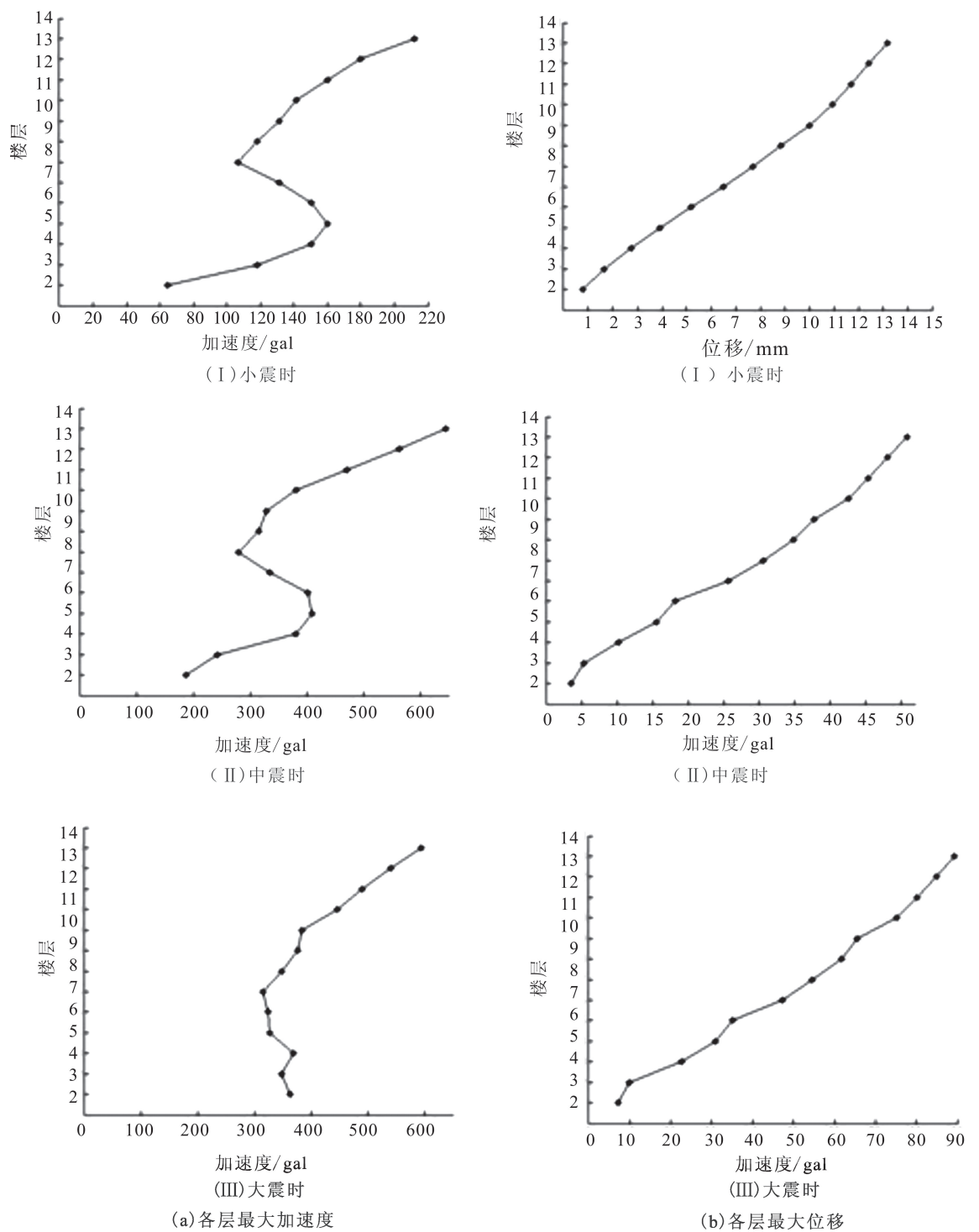


图 4 地震作用下塔身各层加速度和位移

Fig.4 Acceleration and displacement of each layer under the earthquake

为 1/386 和 1/409,视为结构薄弱部位,其余各层均处于弹性阶段;而在地震加速度峰值为 400 gal 时,第 3、6、10 层的层间位移角均大于层间极限位移,参考位移破坏准则,表明此部分已丧失承载能力,同时其余楼层处于刚度退化阶段,整体结构已遭受严重破坏,存在倒塌危险。

2 ECC 加固方案

“盛世修古建”,随着我国经济的飞速发展,古建筑的修复与保护逐渐得到重视,特别是那些具有特殊历史价值和文化意义的古塔。如前所述,我国砖石古塔多数处于地震高发地区,容易遭受地震破坏,

同时由于古代建筑技术及材料限制和长年的风雨侵蚀,导致现存古塔大多存在不同程度的破坏和倒塌,因此古塔的加固和保护工作显得尤为重要。

针对古塔的加固修复,要遵循“修旧如旧”原则,并且具有耐久性和可逆性。现阶段对于砖石古塔,常用的加固方法有^[9]:灌浆法、外箍圈梁加固、增设构造柱、灌浆围箍法、碳纤维加固法等。以上加固技术固然有其自身优点,但同时也存在一定的局限性。随着科学技术的发展,新材料和新做法的出现为古塔加固技术提供了新的补充。

2.1 ECC 简介及应用

高延性纤维增强水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite,ECC),最早由美国 Michigan 大学的 Li 和 Leung 于 20 世纪 90 年代提出,它是基于微观力学和断裂力学原理优化设计。ECC 是由水泥、粉煤灰、水、细骨料、PVA 纤维、减水剂等组成的纤维增强基复合材料,其在材料性能和结构性能方面均表现优异。在材料方面,ECC 抗拉强度高,超过钢、铝合金等材料(一般为 1 600~2 500 MPa);弹性模量高,是普通混凝土的 100~300 倍,且饱和状态的多点开裂,裂缝宽度小于 3 mm^[10];PVA-ECC 材料性能优异,但成本较低,便于实际应用;材料无毒、无污染,对人体无害。结构方面,ECC 可有效提高结构的承载能力、抗剪能力、耗能能力、变形能力、剥落能力、裂缝控制能力等,特有的拉伸应变-硬化性能和多缝开裂特征让 ECC 在工程应用方面快速发展。

砌体结构取材方便、历史悠久,是目前既有结构主要形式之一,在民用住宅、中小学校舍等建筑中广泛采用。砌体结构虽然有其优点,但由于材料本身限制,导致其抗拉强度低、抗裂性能差,以致结构整体性较差,在历次地震中,此种结构破坏严重,甚至倒塌,造成严重的人员伤亡和经济损失。因此对砌体结构采取有效的抗震加固措施具有重要意义。

现阶段对于砌体结构来说,常用的加固方法有:钢筋网水泥砂浆面层加固法、钢筋混凝土面层加固法、增设圈梁和构造柱加固法、粘贴纤维复合材加固法等。而 ECC 作为一种新型材料,以其优异的特性被逐渐应用到砌体结构的加固之中,使用 ECC 面层加固受损墙体部位,可以提高受损墙体的承载力、延性和耗使用能能力,明显改善砌体的破坏模式,提高震损后砌体结构的抗震性能。

2.2 加固方案

依据小雁塔现有结构形式,结合 ECC 材料特

性,提出一种基于 ECC 材料的加固保护方案。此次使用的是轻质 ECC,密度在 1 g/cm³ 左右,在保证 ECC 优异性能的同时极大降低了材料的密度,在保证结构承载力前提下,降低了结构自重,提高了结构安全性。

文献[11]中 ECC 配合比为:水泥:粉煤灰:砂:水=1:1.5:0.9:0.8,纤维体积掺量为 2%,PVA 纤维采用日本 KURARA YK-II 型。而轻质 ECC 还应包括微小的玻璃泡、聚合物空心珠和起泡剂等,各组分以干粉料的形式,通过控制粒径尺寸,充分混合均匀成为轻质 ECC。

根据前文有限元分析结果,围绕每层楼板,在楼板上下两侧墙体内壁各涂抹一条宽 150 mm、厚 10 mm 的环向 ECC 面层,考虑到 3、6、10 层处刚度相对比较薄弱,故 ECC 面层宽度设置为 300 mm;在墙体转角内侧,涂抹一条宽 300 mm、厚 10 mm 的竖向 ECC 面层,面层两端连接相邻两层楼板所对应部位。塔外加固时,在塔檐根部涂抹一条宽 300 mm、厚 10 mm 的环向 ECC 面层。

2.3 施工步骤及要点

(1) 预先计算好需要涂抹 ECC 的部分,划定具体区域位置。

(2) 对划定区域的墙体表面进行预处理(清除劣化层、打磨、清理),然后进行浇水湿润。

(3) 在相应位置涂抹对应宽度的 ECC 面层,并进行养护。

(4) 针对塔檐处加固时,先将表面活动砖块修建稳固,残缺处修补整齐,之后再涂抹 ECC 面层,并进行养护。

(5) ECC 面层养护结束后,对其表面进行后处理,与周围环境相融合。

(6) 若有特别防护,应采取相应的防护措施。

3 ECC 加固方案数值模拟

对经 ECC 加固后的小雁塔结构进行地震加速度峰值为 400 gal 的 El-Centro 波地震时程反应分析,将其计算结果与加固前塔身反应进行对比。图 5 即为小雁塔结构加固前后各层最大加速度与位移峰值对比图。

从图 5(a)可知,小雁塔加固后底层加速度有所降低,但二层及以上各层由于加固后结构刚度提高,故加速度较加固前显现增加;由图 5(b)得,在大震作用下,加固后结构各层位移峰值减小,且随着楼层增加,差值逐渐变小,其中顶层位移差值为 23.407 mm,

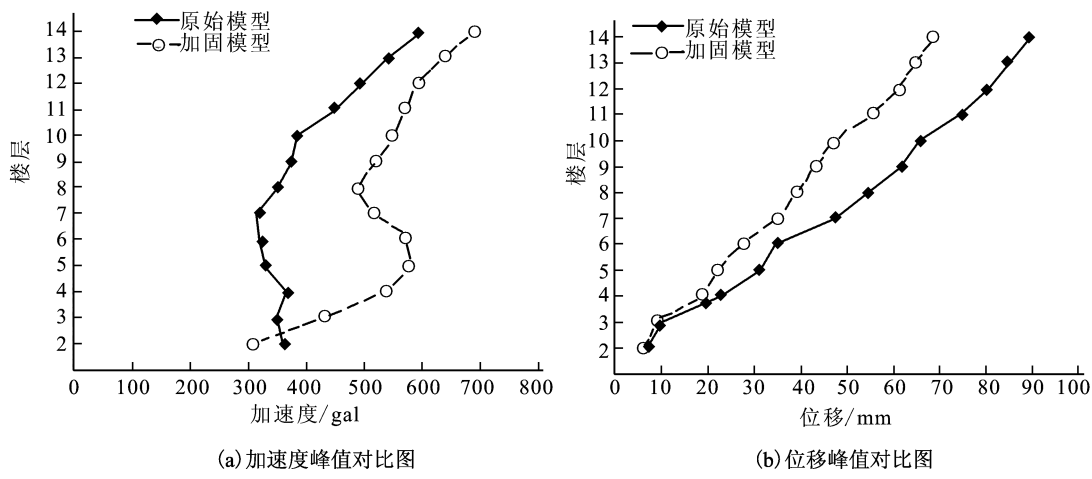


图 5 大震作用下小雁塔结构加固前后加速度和位移峰值对比图
Fig.5 Acceleration and displacement of two models under the earthquake

减小了约 26.2%，塔身各层位移减小范围大致为 15%~30%，说明加固后小雁塔结构整体联系加强，提高了塔身整体抗震性能。

由于小雁塔在历次破坏中，以沿券洞口处破坏和塔身边缘处破坏较多，故 1~5 层洞口处与塔身边缘处的应力对比为例，观察 ECC 面层加固效果，应力对比如表 3 所列。

表 3 2.27 s 时两种模型相同部位应力比较
Table 3 Comparison of the two models with parts of stress in 2.27 s

部位	层数	Von Mises 应力大小/MPa	
		原始模型	ECC 保护模型
洞口角部	1	0.214 3	0.206 0
	2	0.201 9	0.176
	3	0.325 2	0.163 7
	4	0.432 0	0.236 3
	5	0.266 7	0.135 9
塔身边缘	1	0.066 6	0.069 7
	2	0.174 3	0.108 1
	3	0.291 2	0.209 8
	4	0.186 5	0.126 0
	5	0.081 4	0.026 3

由表中数据可得出如下结论：在一层洞口和塔身边缘处，加固前后应力变化较小，这是由于一层塔身体积较大，ECC 加固措施对其地震反应影响甚小；在 3、4 层洞口处，加固前应力已超过砌体极限抗拉强度 0.3 MPa，砌体为受拉破坏，ECC 加固之后，洞口处的应力峰值减小了近 50%；在 3 层塔身边缘处，加固前应力峰值达到了 0.291 2 MPa，接近受拉破坏极限状态，而加固后应力为 0.209 8 MPa，应力减小约 27%。

通过以上分析，可以得出基于 ECC 材料的加固方案构造简单，施工方便，可有效改善小雁塔的抗震性能，提高其结构的整体性和稳定性。

4 结论

通过对小雁塔原型结构和采用 ECC 面层加固后的小雁塔结构进行有限元分析，可初步得出以下结论：

- (1) 对小雁塔的地震响应分析结果表明，在加速度峰值为 400 gal 的地震作用下，结构的第 3、6、10 层层间位移角较大，为结构薄弱部位，同时结构 10 层以上的层间位移角明显大于下部结构，因此上部结构更易遭到破坏。
- (2) 根据有限元分析结果，提出了 ECC 面层的加固方案，确定了 ECC 面层的加固位置，对薄弱部位进行了重点加固。
- (3) 经 ECC 面层加固后，小雁塔结构在地震作用下结构位移反应减小，塔身各处应力减小。ECC 面层加固改善了结构承载力和延性，提高了小雁塔的抗震性能。
- (4) 与传统加固措施相比，采用 ECC 面层加固效果好，施工简便，节约成本，自重低，便于在工程实际中应用，对于古塔加固具有指导意义。

参考文献(References)

[1] 李德虎,何江.砖石古塔动力特性的试验研究[J].工程抗震,1990(3):27-29.
LI Dehu, HE Jiang. Experimental Research on the Dynamic Properties of Masonry Pagodas[J]. Earthquake Resistant Engi-

- neering,1990,(3):27-29.
- [2] 陈平,赵冬,姚谦峰.西安小雁塔抗震能力探讨[J].西安建筑科技大学学报,1999,31(2):149-151.
CHEN Ping,ZHAO Dong,YAO Qianfeng.An Exploration of the Seismic Behavior of Xi'an Pagoda[J].Journal of Xi'an Univ of Arch & Tech,1999,31(2):149-151.
- [3] 姚谦峰,卢俊龙,张荫.砖石古塔抗震加固对策探讨[J].工业建筑,2007,37(9):115-118.
YAO Qianfeng,LU Junlong,ZHANG Yin.Research on Seismic Reinforcement Methods for Masonry Pagodas[J].Industrial Construction,2007,37(9):115-118.
- [4] 芦苇,赵冬,王玉兰.基础刚度对砖石古塔地震响应影响研究[J].地震工程学报,2016,38(4):498-503.
LU Wei,ZHAO Dong,WANG Yulan.Impact of Foundation Stiffness on the Seismic Response of Ancient Masonry Pagoda[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(4):498-503.
- [5] 李英民,韩军,刘立平.ANSYS 在砌体结构非线性有限元分析中的应用研究[J].重庆建筑大学学报,2006,28(5):90-96.
LI Yingmin,HAN Jun,LIU Liping.Application of ANSYS to Finite Element Analysis for Nonlinear Masonry Structures[J].Journal of Chongqing Jianzhu Univ,2006,28(5):90-96.
- [6] 施楚贤.砌体结构[M].第二版.北京:中国建筑工业出版社,2008:35-39.
SHI Chuxian.Masonry structures[M].Second Edition. Beijing: China Architecture & Building Press,2008:35-39.
- [7] 砌体结构设计规范,GB 50003-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
Code of Design of Masonry Structures,GB 50003-2011[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2011.
- [8] 张文明.砖石古塔的抗震性能评估及地震破坏机理研究[D].西安:西安建筑科技大学,2008.
ZHANG Wenming.Studies on Seismic Behavior Evaluation and Seismic Broken Mechanics of Ancient Masonry Pagodas[D].Xi'an:Xi'an University of Architecture & Technology,2008.
- [9] 呼梦洁.震损砖石古塔灌浆围箍加固的抗震性能试验研究[D].扬州:扬州大学,2013.
HU Meng-jie. Experiment Research on Seismic Behavior of Damaged Masonry Pagoda Walls Strengthened by Grouting and Surrounding-hoop Reinforcement[D].Yangzhou: University of Yangzhou,2013.
- [10] 罗敏.绿色高性能纤维增强水泥基复合材料加固钢筋混凝土柱试验研究[D].济南:山东建筑大学,2013.
LUO Ming.The Experimental Study on the Columns Reinforced by Green High-performance Fiber-reinforced Cementitious Composites[D].Jinan:Shandong Jianzhu University,2013.
- [11] 邓明科,樊鑫淼,高晓军,等.ECC 面层加固受损砖砌体墙抗震性能试验研究[J].工程力学,2015,32(4):120-129.
DENG Mingke,FAN Xinmiao,GAO Xiaojun,et al.Experimental Investigation on Seismic Behavior of Damaged Brick Masonry Wall Strengthened with ECC Splint[J].Engineering Mechanics,2015,32(4):120-129.