

以蒸压加气混凝土为底板的叠合楼板 承载试验与研究

徐春一¹,成良浩¹,阎磊²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳市建设工程质量监督站,辽宁 沈阳 110002)

摘要 目的 研究以蒸压加气混凝土为底板后浇混凝土的新型叠合楼板受弯性能及破坏形态。方法 设计两块长×宽×高为3 600 mm×600 mm×150 mm的蒸压加气混凝土底板,后浇60 mm厚混凝土与其叠合形成新型叠合楼板试件,对试件进行四分点加载并观察裂缝分布状态,绘制荷载-挠度曲线,分析其受弯性能及破坏形态。结果 试件开裂后裂缝分布较为稀疏,裂缝宽度较大,最终破坏形态为发生在支座处的斜拉破坏。加载初期荷载-挠度曲线呈线性增长,开裂后曲线斜率逐渐变小,挠度增大。HPB300钢筋为光圆钢筋,工程应用时建议在板底增大横向钢筋间距,用HRB400小直径带肋钢筋代替HPB300光圆钢筋。结论 试件具有良好的整体性,预制板与后浇混凝土能协同受力,挠度满足规范要求。

关键词 蒸压加气混凝土;叠合楼板;承载性能;变形能力

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Load-bearing Tests and Research on Laminated Floor Slabs with Autoclaved Aerated Concrete as the Base Slab

XU Chunyi¹, CHENG Lianghao¹, YAN Lei²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Shenyang Construction Engineering Quality Supervision, Shenyang, China, 110002)

Abstract: To study the bending performance and damage pattern of the new laminated floor slab with autoclaved aerated concrete as the base slab and post-cast concrete. Two autoclaved aerated concrete base slabs with length×width×height of 3 600 mm×600 mm×150 mm were designed and 60mm thick concrete was poured to form the new laminated floor slab specimens. After cracking, the crack distribution is sparse and the crack width is large, and the final damage is diagonal tensile damage at the

收稿日期:2021-07-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51808353);辽宁省教育厅服务地方项目(Infw201905);沈阳建筑大学科研创新培育计划项目(CXPY2017022)

作者简介:徐春一(1983—),女,教授,博士,主要从事现代砌体结构等方面研究。

support. The load-deflection curve was linear at the early stage of loading, and the slope of the curve gradually became smaller and the deflection increased after cracking. hpb300 reinforcement is light-round reinforcement, and it is recommended to increase the spacing of transverse reinforcement at the bottom of the slab and replace hpb300 light-round reinforcement with HRB400 small diameter ribbed reinforcement. The specimen has good integrity, and the precast slab and the post-cast concrete can be stressed together, and the deflection meets the specification requirements.

Key words: autoclaved aerated concrete; laminated floor slabs; load-bearing performance; deformation ability

蒸压加气混凝土具有自重轻、防火性能优越、隔热和保温等优点,在建筑行业得到了广泛应用^[1-4]。众多学者对蒸压加气混凝土的性能及应用进行了研究,贺安琪等^[5]对蒸压加气混凝土砌块填充墙的易损性进行研究,建立了蒸压加气混凝土砌块填充墙的易损伤模型,并提出易损性参数及易损性曲线;陈博珊等^[6]对蒸压加气混凝土外挂板进行抗弯性能研究,对不同配筋试件进行比较并对试验做出模拟;徐春一等^[7]研究了蒸压加气混凝土板内钢筋自应力;张京街等^[8]研究了蒸压加气混凝土楼板的抗弯性能,分析了两种不同配筋楼板的受弯情况;董博文^[9]研究了蒸压加气混凝土砌体墙的抗震性能。

截至目前,国内外学者对蒸压加气混凝土研究多以块体为主^[10-15],对蒸压加气混凝土板材研究较少,而对于以蒸压加气混凝土为底板的叠合板更是鲜有研究。基于此,笔

者提出了一种以蒸压加气混凝土为底板,后浇混凝土与其叠合而成的新型叠合楼板。通过研究此种叠合板受弯性能及破坏形态,验证叠合板正常使用荷载作用下的挠度和刚度是否满足要求,提出新型叠合板受弯承载力的计算公式,为工程应用以及相关规范编制提供理论依据。

1 试验

1.1 试件参数

试验所有试件均由大连铁龙新型材料有限公司提供。试件采用以蒸压加气混凝土为底板,后浇普通混凝土叠合层。蒸压加气混凝土底板长度 $L=3\ 600\text{ mm}$,宽度 $b=600\text{ mm}$,厚度 $h=150\text{ mm}$,后浇混凝土厚度 $h_1=60\text{ mm}$ 。蒸压加气混凝土底板配置了8根直径为8 mm的HPB300受拉钢筋和两根直径为5 mm的HPB300受压钢筋。试验设计了两块板材,编号为B-1、B-2。试件设计如图1所示。

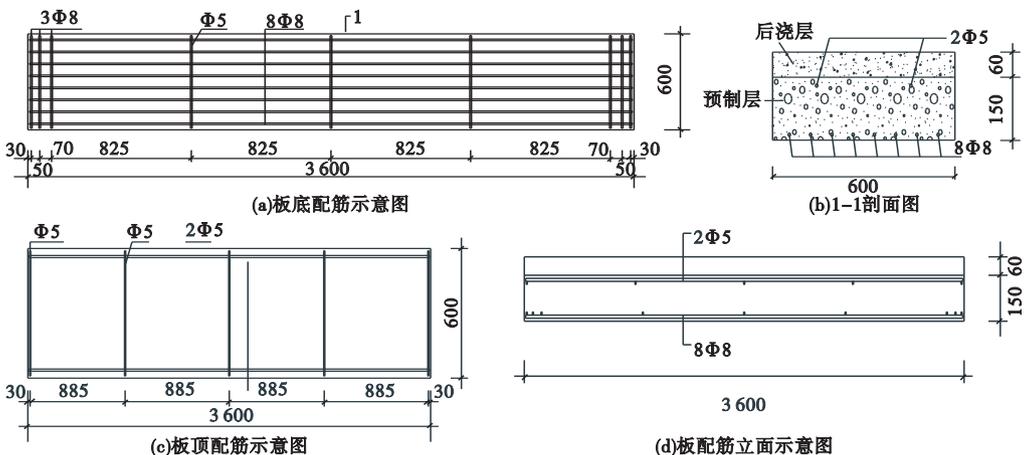
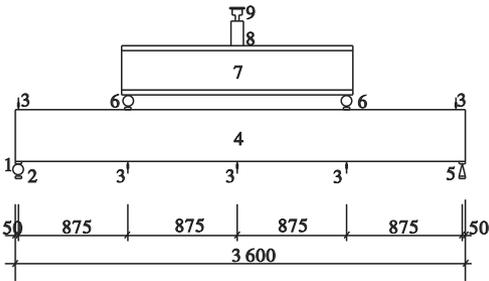


图1 试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test piece

1.2 加载装置

试验按照《蒸压加气混凝土板》(GB15762—2020)^[16]规定进行。受弯性能试验采用集中力四分点加载法。试验时叠合楼板一端采用固定铰支座,另一端采用滑动支座,固定铰支座限制叠合楼板的横向位移和竖向位移,滑动支座只限制叠合楼板的竖向位移。两支座中心距离均距叠合楼板端部50 mm。试件加载点处放置钢垫片,垫片上放置加载点滚筒,滚筒选用具有充分抗弯刚性的钢制圆管。滚筒上部放置加载用分配横梁,横梁上布置传感器,传感器上与千斤顶连接。试验装置如图2所示。



1. 钢制垫板;2. 滑动支座;3. 位移计;4. 试件;5. 固定铰支座;6. 加载点钢管;7. 分配梁;8. 千斤顶;9. 压力传感器。

图2 试验装置

Fig. 2 Schematic diagram of the test device

1.3 加载制度

在进行正式加载前,对试件进行预加载,以检查试验装置是否工作正常,支座是否平稳,预加载值不超过试件极限荷载计算值的10%。正式加载后,每级加载值不大于正常使用荷载设计值的20%;接近开裂荷载计算值时,每级加载不大于正常使用荷载设计值的5%;试件开裂后每级加载值取正常使用荷载设计值的10%;当荷载超过正常使用荷载设计值时,每级加载不大于正常使用荷载设计值的10%;加载到承载能力极限状态的试验阶段时,每级加载值不大于承载力状态荷载设计值的5%。每级荷载加载完成后持续时间不少于10 min,且每级加载时间均相同;在正常使用荷载设计值或开裂荷载设计值作用下,持续时间不少于15 min;如荷载达到开裂荷载

设计值之前已经出现裂缝,则在开裂荷载计算值下的持续时间不少于10 min。

1.4 观测内容及测点布置

试验主要观测蒸压加气混凝土叠合板的裂缝出现及开展情况,测试记录板底挠度、钢筋及混凝土应变、截面应变分布等,验证截面应变是否符合平截面假定。

1.4.1 挠度测量

板底支座、跨中及四分点加载处对称布置100 mm量程的位移计,测试各级荷载下板底挠度,绘制荷载-挠度曲线。

1.4.2 板底受拉钢筋和板面受压钢筋应变

每块叠合板侧面粘贴3个应变片,底面、顶面各粘贴两个应变片,每块叠合板的受拉钢筋均粘贴两个应变片,应变片间距以及编号如图3所示。应变片连接到静态应变仪,实时测量钢筋和混凝土在持续荷载作用下的应变,并绘制板钢筋荷载-应力曲线。

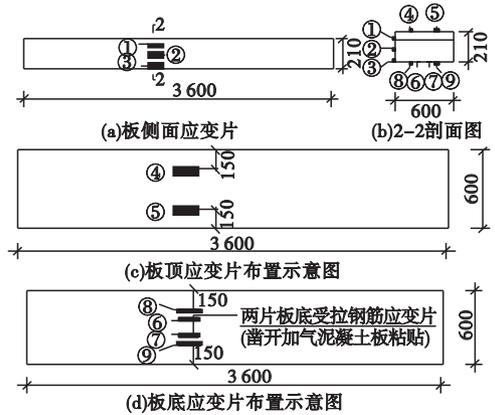


图3 应变片粘贴位置示意图

Fig. 3 Strain gauge paste position diagram

1.4.3 裂缝测量

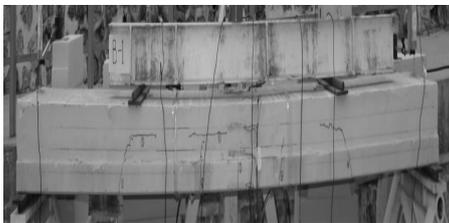
试件表面用石灰水刷白,试验前清理试件周围杂物,便于观察裂缝。用裂缝测宽仪观察各级荷载作用下的裂缝宽度,用钢尺测量裂缝间距。描绘记录裂缝分布。

2 试验结果与分析

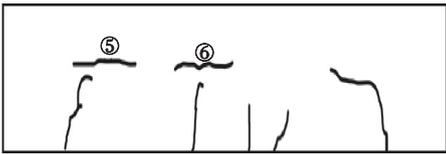
2.1 试件 B-1

试件 B-1 加载初期无明显裂缝产生,加

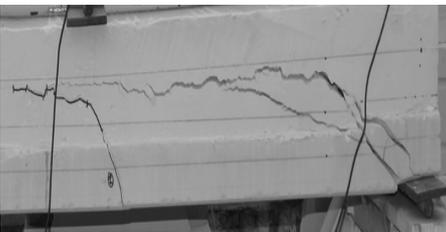
载至 33.38 kN 时,叠合板侧面左右加载点位置开始出现裂缝,裂缝由加载点出现向跨中沿 45° 方向倾斜,记此时出现的两条裂缝为 ①号、②号裂缝。随着荷载的增加,当加载至 35.83 kN 时,在叠合板的跨中位置相继出现 ③号、④号竖向裂缝,同时 ①号、②号裂缝沿 45° 斜向上延展,其中 ②号裂缝开始出现向横向发展的趋势。加载至 38.30 kN 时,在左侧加载点及跨中距板底 150mm 的叠合层附近出现两条横向裂缝(⑤号、⑥号裂缝),此时 ②号裂缝由 45° 斜裂缝逐渐趋近为横向裂缝。继续加载至 45.69 kN 时,在跨中位置出现 ⑦号竖向裂缝,其余 ①~⑥号裂缝的宽度、长度均有所增加。持续加载到 50.10 kN 时,试件跨中位置及四分点位置发生较大变形,在没有明显前兆的情况下,试件在右侧支座处突然开裂并伴有较大响声,此时支座处 ②号裂缝贯穿且长度最大,试验结束。试件 B-1 破坏状态如图 4 所示。



(a)试件B-1破坏现象



(b)试件B-1裂缝发展图



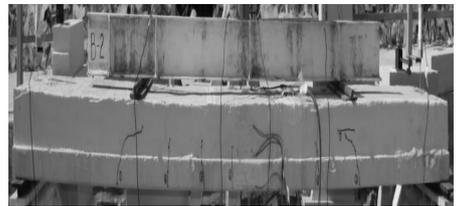
(c)试件B-1极限荷载局部破坏状态

图4 试件 B-1 破坏状态

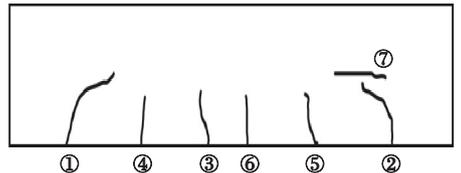
Fig. 4 Specimen B-1 damage state

2.2 试件 B-2

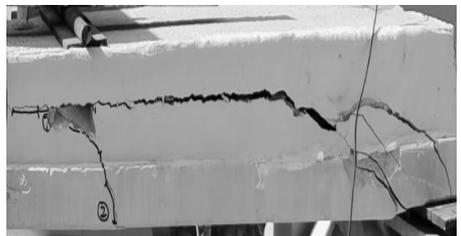
试件 B-2 加载初期无明显裂缝产生。加载至 33.38 kN 时,在叠合板侧面左右加载点处出现自加载点处向跨中沿 45° 倾斜的 ①号、②号裂缝。继续加载至 34.60 kN 时,在跨中位置出现 ③号、④号、⑤号竖向短裂缝,此时 ①号、②号裂缝沿 45° 方向延展的同时均开始出现横向发展的趋势。加载至 43.22 kN 时,出现 ⑥号、⑦号裂缝,其中 ⑦号裂缝为横向裂缝,水平位于右侧加载点处,垂直位于距板底 150 mm 的叠合层处,同时 ①~⑤号裂缝长度、宽度均有所增加。最终加载至 53.07 kN 时,右支座处突然破坏并伴有响声,右侧支座处裂缝贯通 ②号⑦号裂缝且长度达到最大,试验结束。试件 B-2 破坏状态如图 5 所示。



(a)试件B-2破坏现象



(b)试件B-2裂缝发展图



(c)试件B-2极限荷载局部破坏状态

图5 试件 B-2 破坏状态

Fig. 5 Specimen B-2 damage state

2.3 试验现象分析

试件 B-1 与试件 B-2 破坏形态基本一致,由于试件剪跨比 $\lambda = M/Vh_0 > 3$,故试验

最终破坏形态为发生在支座处的斜拉破坏。加载初期,试件均处于弹性阶段,此时并无裂缝出现。当荷载继续增加时,试件加载点位置正处于剪力最大区域,而板底受拉钢筋上的第一道分布钢筋正位于此,荷载作用下板底钢筋会与板体产生相对滑移,此时横向钢筋对板体产生挤压应力。由于此处受拉且与剪应力、挤压应力共同作用,主应力方向为 45° 倾斜,故左右对称加载点处沿主应力方向最早出现①号、②号裂缝,自加载点向跨中 45° 倾斜。

叠合板跨中位置处裂缝形态为竖向短裂缝,且裂缝间距、宽度较大。这是由于跨中位置在弯矩作用下产生主应力,此处弯曲应力最大,且板内布置的板底受拉钢筋均为HPB300光圆钢筋,钢筋与板材之间的粘结面积与机械咬合力较小。

由破坏现象可知,板材侧面的横向裂缝位置均处于距离板底150 mm处,跨中及加载点处裂缝延展最大高度也位于此。这是因为距离板底150 mm处为蒸压加气混凝土底板与后浇普通混凝土叠合层,随荷载增加,试件裂缝由板底延展至叠合面,而后沿叠合面水平方向迅速发展,使得叠合层处形成水平裂缝。由于剪力的存在,此水平裂缝最先出现于左右加载点处,荷载作用下裂缝沿水平方向向两侧延展,宽度逐渐增大。由此可知叠合面处蒸压加气混凝土与后浇普通混凝土的结合强度较低,当破坏荷载作用下支座一旦开裂易与此横向裂缝形成贯通,在无明显前兆下试件突然破坏。

在工程中建议在支座处设置能承受斜截面破坏的弯起钢筋或箍筋来抵抗斜截面破坏,使得斜截面在发生破坏时会有明显前兆,避免突然发生破坏。对于横向裂缝,可以在新型叠合板的叠合层处做处理,如设置锚筋等,使得在裂缝开展至叠合面时能继续向上部混凝土传力。

2.4 荷载-挠度曲线

试件跨中荷载-挠度曲线如图6所示。由图可知,加载初期,跨中挠度随荷载的增加而增加,曲线上基本呈线性关系,观察试验现象可知此时尚未出现裂缝,叠合板处于弹性阶段。当试件B-1与试件B-2上的荷载分别加载至25.99 kN和26.45 kN时,曲线斜率发生突变,根据试验现象,此时挠度明显增加,由此可知此时叠合板由弹性阶段逐渐进入弹塑性阶段。进入弹塑性阶段后曲线斜率明显下降,当试件B-1与试件B-2分别加载至50.1 kN和53.07 kN时,试件支座处发生斜拉破坏,试验结束。

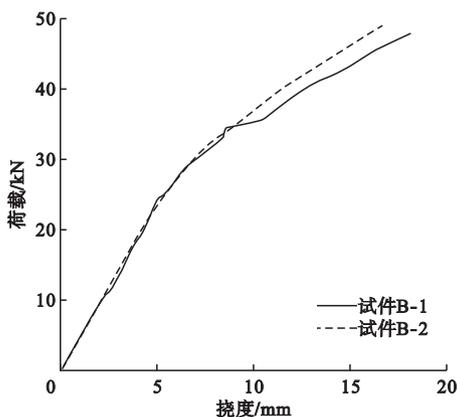


图6 叠合楼板跨中荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-deflection curves in the span of laminated floor slabs

3 承载力计算

同济大学顾祥林教授在《混凝土结构基本原理》^[17]提出,加载初期截面处于弹性工作阶段,混凝土拉应力很小,故当受拉区边缘加气混凝土应力达到极限抗拉强度后,可假设叠合板为矩形截面,于是在板底有:

$$F = \sigma_s A_s = \frac{E_s}{E_a} \sigma_a A_s = \alpha_E A_s \sigma_a \quad (1)$$

叠合层处有:

$$F = \sigma_c A = \frac{E_c}{E_a} \sigma_a A = \alpha'_E A \sigma_a \quad (2)$$

式中: σ_s 、 σ_a 、 σ_c 分别为钢筋拉应力、蒸压加

气混凝土拉应力、后浇混凝土压应力; E_s 、 E_a 、 E_c 分别为钢筋弹性模量、蒸压加气混凝土弹性模量、后浇混凝土弹性模量; A_s 、 A 为受拉钢筋截面面积及混凝土截面面积。

根据西南交通大学孙训芳教授在《材料力学》^[18]中提出的正截面计算公式,叠合层应力分析可按式计算:

$$\sigma = \frac{My}{I_z} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{F S_z^*}{I_z b} \quad (4)$$

其中, $y = \frac{A_1 X_1 + A_2 X_2}{A_1 + A_2}$, $I_z = \frac{bh^3}{12}$, $S_z^* = \int_{A^*} y_1 dA$ 。

经计算试件中心轴大致位于叠合层处,叠合层剪应力为 24.8 kN,对比试验数据发现,两个试件荷载-挠度曲线的突变荷载为

25.99 kN、26.45 kN,与计算值分别相差 4.5%、6.2%。由此可知,符合预期要求。

计算值与实测值对比曲线如图 7 所示。从图中可以看出,加载初期,两个试件的实测值与理论值均有小范围偏差,这是由于蒸压加气混凝土预制板在生产过程中钢筋存在自应力,自应力的存在使得试件在出厂时存在 2~3 mm 的反拱。试验过程中,叠合层处也存在一定约束,所以实测挠度较理论挠度小。叠合层破坏前,理论值与实测值曲线大致按正比例增加,由此可以说明荷载-挠度曲线以刚度系数按正比例增加,刚度系数变化较小。而叠合层破坏后实测曲线斜率逐渐减小,开裂后刚度逐渐降低,此时挠度增加较快,同时理论值与实测值的偏差逐渐增大。

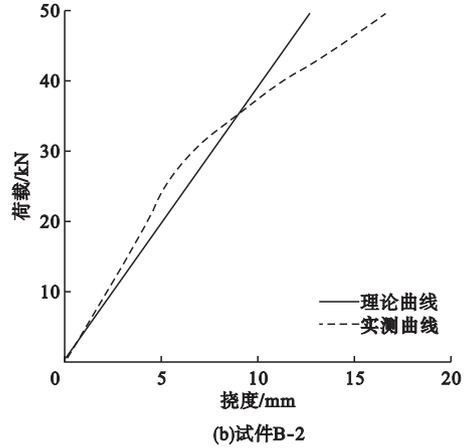
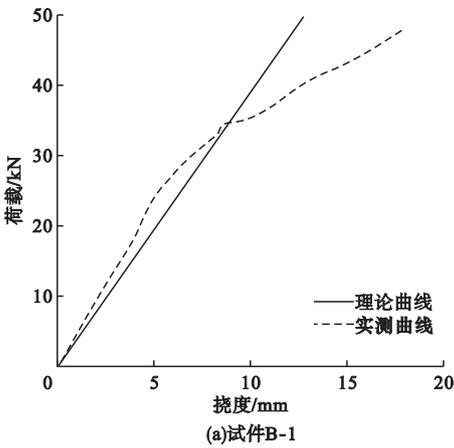


图 7 荷载-挠度理论曲线与实测曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-deflection theoretical curves and measured curves

4 结论

(1) 蒸压加气混凝土叠合板受弯承载力较单一蒸压加气混凝土板有一定提高,且开裂荷载、极限荷载及极限位移均满足规范要求。

(2) 支座处剪力过大会影响叠合楼板的承载力,在工程应用时可以对叠合面做锚筋处理,或将板顶板底钢筋网片焊接成笼,以保证支座处以及叠合层的可靠工作,避免发生斜拉破坏。

(3) 由裂缝分布状态可知,为防止加载点位置处过早出现裂缝,在考虑剪力的同时不应忽略钢筋滑移对其产生的挤压作用。建议在底板距板端 1 200 mm 范围内加密板底横向分布钢筋间距,将加载点处单根钢筋的挤压应力有效分布到多根钢筋共同作用。

(4) 由荷载-挠度曲线可知,配置 HPB300 的两个试件在加载初期,荷载与挠度可保持线性增长,而开裂后挠度增长较快。是由于 HPB300 为光圆钢筋,与板材的机械咬合力、握裹力较差。建议用 HRB400 带肋

小直径钢筋替换 HPB300 光圆钢筋,以达到增强钢筋和板材之间握裹力和机械咬合力的目的,可缓解开裂后裂缝发展过快,使得裂缝分布细而密。

参考文献

- [1] 刘艳军,陈博田,陈玉. 加气混凝土国内外发展回顾[J]. 建筑节能,2013,41(265):30-34.
(LIU Yanjun, CHEN Botian CHEN Yu. Literature review on the development and application of autoclaved aerated concrete in China and overseas [J]. Building energy efficiency,2013,41(265):30-34.)
- [2] 黄炜,罗斌,李斌,等. 不同构造形式绿色混凝土叠合板受弯性能试验[J]. 湖南大学学报,2019,46(7):35-44.
(HUANG Wei, LUO Bin, LI Bin, et al. Experiment on flexural behavior of green concrete composite slab with different structural forms [J]. Journal of Hu'nan university,2019,46(7):35-44.)
- [3] YANG H W. Exterior wall thermal insulation technology and application of building energy saving materials [J] Construction & design for engineering,2017(11):41-42.
- [4] YAVUZ Y, WALEED A M T, JAAFA R M S, et al. AAC concrete light weight precast composite floor slabs [J]. Construction & building materials,2012,10(11):405-410.
- [5] 贺安琪,赵作周. 蒸压加气混凝土砌块填充墙的易损性研究[J]. 地震工程与工程振动,2020,40(6):178-185.
(HE Anqi, ZHAO Zuozhou. Study on fragility of autoclaved aerated concrete block infills [J]. Earthquake engineering and engineering vibration,2020,40(6):178-185.)
- [6] 陈博珊,张国伟,吴继丰,等. 蒸压加气混凝土板抗弯性能试验及数值模拟研究[J]. 新型建筑材料,2018,45(9):61-65.
(CHEN Boshan, ZHANG Guowei, WU Jifeng, et al. Experimental test and numerical analysis study on bending strength of autoclaved aerated concrete panel [J]. New building materials,2018,45(9):61-65.)
- [7] 徐春一,武洁青,阎磊. 基于释放法蒸压加气混凝土板内钢筋自应力研究[J]. 工程力学,2020,36:327-339.
(XU Chunyi, WU Zhanqing, YAN Lei. Research on self-stress of steel bars in autoclaved aerated concrete slab based on release method [J]. Engineering mechanics,2020,36:327-339.)
- [8] 张京街,张兴伟,池海. 蒸压加气混凝土楼板抗弯性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2019,45(3):52-58.
(ZHANG Jingjie, ZHANG Xingwei, CHI Hai. Experimental study on flexural behavior of autoclaved aerated concrete slabs. [J]. Sichuan building science research,2019,45(3):52-58.)
- [9] 董博文. 蒸压加气混凝土砌体墙抗震性能试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
(DONG Bowen. Experimental study on seismic performance of autoclaved aerated concrete masonry wall [D]. Chongqing: Chongqing University,2011.)
- [10] WLISON S, TANNER J E, JENNIN G S C. Evaluation of exterior wall behavior using reinforced autoclaved aerated concrete as cladding [J]. Journal of structural engineering,2018,144(10):1-7.
- [11] PENG J, PENG X. A review on structure and properties of aerated concrete [J]. Materials review,2011,25(1):89-93.
- [12] CHEN G, LI F, JING P, et al. Effect of pore structure on thermal conductivity and mechanical properties of autoclaved aerated concrete [J]. Materials,2021,14(2):339.
- [13] YANG E H, LIU Y Q, CHEN Z T. Environmental sustainability through recycling incineration bottom ash for the production of autoclaved aerated concrete [J]. Key engineering materials,2015,650:51-70.
- [14] ELDAR S, ARMAN A, ALMAS S, et al. Properties of non-autoclaved aerated concrete with quadruple cementitious mixture using response surface method [J]. Materials science forum,2018,917:337-341.
- [15] 赵成文,吴迪,高连玉. 蒸压加气混凝土砌体水平灰缝钢筋锚固试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(2):243-250.
(ZHAO Chengwen, WU Di, GAO Lianyu. Experimental study on steel bar anchor length in horizontal mortar seam of autoclaved aerated concrete masonry [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2013,29(2):243-250.)
- [16] 中国标准化化管理委员会. 蒸压加气混凝土板:GB15762—2020[S]. 北京:中国质检出版社,2020.
(Standardization Administration of China. Autoclaved aerated concrete slabs:GB15762—2020[S]. Beijing: China Quality Supervision Press,2020.)
- [17] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 上海:同济大学出版社,2015.
(GU Xianglin. Basic principles of concrete structure [M]. Shanghai: Tongji University Press,2015.)
- [18] 孙训芳,方孝淑,关来泰,等. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
(SUN Xunfang, FANG Xiaoshu, GUAN Laitai, et al. Mechanics of materials [M]. Beijing: Higher Education Press,2008.)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 蒸压加气混凝土制品应用技术标准:JGJ/T17—2020[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.
(Ministry of Construction of the PRC. Technical standard for application of autoclaved aerated concrete product:JGJ/T17—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2020.)
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)