

基于释放法蒸压加气混凝土板内钢筋自应力研究

徐春一¹, 武沾青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: 为研究分析蒸压加气混凝土板中钢筋在高温蒸压过程产生的自应力及其对板受力性能的影响, 试验采用分步释放法测自应力, 通过对配置 HPB300 钢筋的蒸压加气混凝土板进行切割逐步释放板中钢筋的自应力, 记录对比蒸压加气混凝土板受压侧和受拉侧在跨中及板端自应力值, 给出自应力在板内分布规律及取值。分析自应力对板的开裂弯矩及承载能力的影响。试验结果表明: 蒸压加气混凝土板受压区板端自应力约为跨中自应力值的 56%; 受拉区板端自应力约为跨中自应力值的 84%, 跨中受拉区自应力约为受压区自应力的 54%; 板端受拉区自应力约为受压区的 83%, 并分析其产生及分布机理。此外, 自应力也提高了板的抗裂能力, 其中对开裂弯矩有较大影响, 自应力所抵抗的开裂弯矩约为理论开裂弯矩值的 65.7%。合理计算自应力可以有效利用蒸压加气混凝土板的抗裂和承载能力, 对蒸压加气混凝土板的推广与发展有重要的理论价值和现实意义。

关键词: 蒸压加气混凝土板; 释放法; 自应力; 开裂弯矩; 抗裂能力

中图分类号: TU37 文献标志码: A doi: [10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.S064](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.S064)

RESEARCH ON SELF-STRESS OF STEEL BARS IN AUTOCLAVED AERATED CONCRETE SLAB BASED ON RELEASE METHOD

XU Chun-yi¹, WU Zhan-qing¹, YAN Lei²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110002, China;

2. Shenyang Construction Engineering Quality Supervision Station, Shenyang, Liaoning 110002, China)

Abstract: In order to study and analyze the self-stress and the effect of steel bars in autoclaved aerated concrete slabs, the self-stress was measured by the release method. The self-stress of steel bars in the cutting release plate was produced by the autoclaved aerated concrete slabs equipped with HPB300 steel bars. The self-stress values on compression and tension sides of the autoclaved aerated concrete slab at the mid-span and the plate end were obtained, and the influence of self-stress on the cracking moment and bearing capacity of the plate was analyzed. The test results show that the self-stress at the plate end of the autoclaved aerated concrete slab is about 56% of the self-stress at the mid-span; the self-stress of the tension zone at the plate end is about 84% of that at the mid-span. At the mid-span, the self-stress of tension zone is about 54% of that of the compression zone; while at the plate end, the self-stress of the tension zone is about 83% of that of the compression zone. In addition, the self-stress also improves the crack resistance of the plate, which has a great influence on the cracking moment. The cracking moment resisted by the self-stress is about 65.7% of the theoretical cracking moment. Reasonable calculation of self-stress can effectively utilize the crack resistance and bearing capacity of autoclaved aerated concrete slabs, which has important theoretical and practical significance for the promotion and development of autoclaved aerated concrete slabs.

Key words: autoclaved aerated concrete slab; release method; self-stress; cracking moment; carrying capacity

收稿日期: 2019-04-30; 修改日期: 2020-01-21

基金项目: 辽宁省自然科学基金指导计划项目(20170540765); 辽宁省教育厅服务地方项目(lnfw201905); 沈阳建筑大学科研创新培育计划项目(CXPY2017022)

通讯作者: 徐春一(1983—), 女, 辽宁人, 副教授, 博士, 硕士, 主要从事现代砌体结构研究 (E-mail: xuchunyi@163.com).

作者简介: 武沾青(1992—), 男, 山西人, 硕士生, 主要从事现代砌体结构研究 (E-mail: 2283879288@qq.com);

阎磊(1979—), 男, 辽宁人, 工程师, 硕士, 分站站长, 主要从事结构工程研究 (E-mail: YL_9800@163.com).

蒸压加气混凝土板是以硅、钙为原材料,以铝粉(膏)为发气剂,以经防锈处理的钢筋增强,经过蒸汽养护而成的高性能、多气孔混凝土成型板材,既可作墙体材料,又可作屋面板和楼板。蒸压加气混凝土(AAC)板具有环保利废、保温隔热、可加工性强、质轻等优点^[1]。国内外已有专家学者对AAC进行了一系列的试验研究;在生产工艺与房屋建设方面,提出了新的建筑体系和施工工艺^[2]。2002年,同济大学的陈海燕^[3]对伊通轻质砂加气混凝土矩形和异形屋面板做了比较系统的研究。2006年,Getz和Memari^[4]对8块蒸压加气混凝土外挂墙板进行了拟静力试验研究以验证墙板连接节点的抗震性能。2007年,同济大学顾乐乐^[5]对带饰面层的伊通加气混凝土板进行往复疲劳试验。试验研究表明,在承受多次往复荷载作用后,饰面层与加气混凝土墙板之间粘接强度并没有因此下降很多。2008年,天津大学的于敬海^[6]通过16片蒸压轻质加气混凝土砌体墙的拟静力试验,研究不同因素对AAC砌体墙的力学性能、破坏现象、刚度退化等性能的影响。2014年,长安大学的李晓丹^[7]基于大量试验研究得到了加气混凝土墙板的承载力理论公式。2015年,瑞士的Ghazi^[8]教授研究不同程度的火灾对加气混凝土墙板保温性能的影响。2016年,同济大学陈博珊等^[9]对蒸压加气混凝土外挂墙板进行滞回性能的研究,试验中研究了多种因素对滞回性能的影响。2016年,张国伟等^[10]等通过8块蒸压加气混凝土外挂墙板的抗弯试验,研究了蒸压加气混凝土外挂墙板的抗弯性能,对比分析了跨度和剪跨比对板材的刚度、延性和承载力的影响。为了解决传统的砌体填充墙自重大且抗拉性能差等问题,并提高该类型结构抗震性能。2018年,阳超^[11]提出了一种装配式AAC砌体填充墙,并通过试验对它的平面外抗震性能和破坏机理进行研究,给出了装配式AAC砌体填充墙的平面外承载力计算公式和设计方法。

目前,国内外针对蒸压加气混凝土板用作民用或工业房屋的屋面板、楼板以及墙板的研究有很多,但是对于蒸压加气混凝土板中自应力的研究很少。所谓自应力就是配筋加气混凝土板的制造过程中,经过高温高压(185℃, 15 atm)蒸养,出釜脱模后逐渐降至常温,由于钢筋和加气凝

土线膨胀系数的差别,在高温中钢筋会膨胀伸长而加气混凝土会凝固,故在板材的降温过程中,钢筋回缩受到加气混凝土的束缚挤压而造成预应力状态,且钢筋本身受拉。鉴于此,本文提出了通过释放法测量蒸压加气混凝土板中的自应力并通过公式计算分析了自应力对蒸压加气混凝土板抗裂能力的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

蒸压加气混凝土楼板配置HPB300光面普通钢筋,板的几何尺寸均为4200 mm×600 mm×200 mm,上部受压区为3根直径5 mm的钢筋,下部受拉区为6根直径8 mm的钢筋,板的配筋率为0.286%,其余锚固筋和构造筋均为直径5 mm的钢筋。试验板材配筋图如图1所示。

试验前利用江苏淮安汇能新型墙材有限公司提供的蒸压加气混凝土砌块做了相关的材料性能试验。砌块规格尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,砌块强度等级为A5.0,干密度等级为B06,实测抗压强度为5.0 MPa,劈裂抗拉强度为0.53 MPa(劈压比为0.106)。

由于蒸压加气混凝土板制作工艺中有高温存在,为了测量钢筋中的自应力,本次试验在已经成型的板上开槽粘贴钢筋应变片,采用释放应力的方法测量自应力。如图2所示,在板顶和板底的跨中部位对应编号①~③、⑩~⑮的位置处粘贴应变片,在板端部位且距离板底最内侧锚固筋25 cm~30 cm对应编号④~⑤、⑥~⑨的位置处粘贴应变片。

1.2 钢筋自应力的测量方式

本试验采用释放法实测板内钢筋的自应力:

1) 在预定截面按钢筋位置挖去保护层和防锈层,每根钢筋上都粘贴电阻片,释放应力前记取初读数。

2) 在截面两边,用板材锯横向切断试件,取出带电阻片的长50 cm~60 cm一段板材(见图3),再次记取电阻片读数。

3) 用凿子和锥子轻轻地剔除钢筋周围的加气混凝土,取出钢筋,读取电阻片最后读数,计算和初读数的差值,乘以弹性模量就得钢筋的自应力。

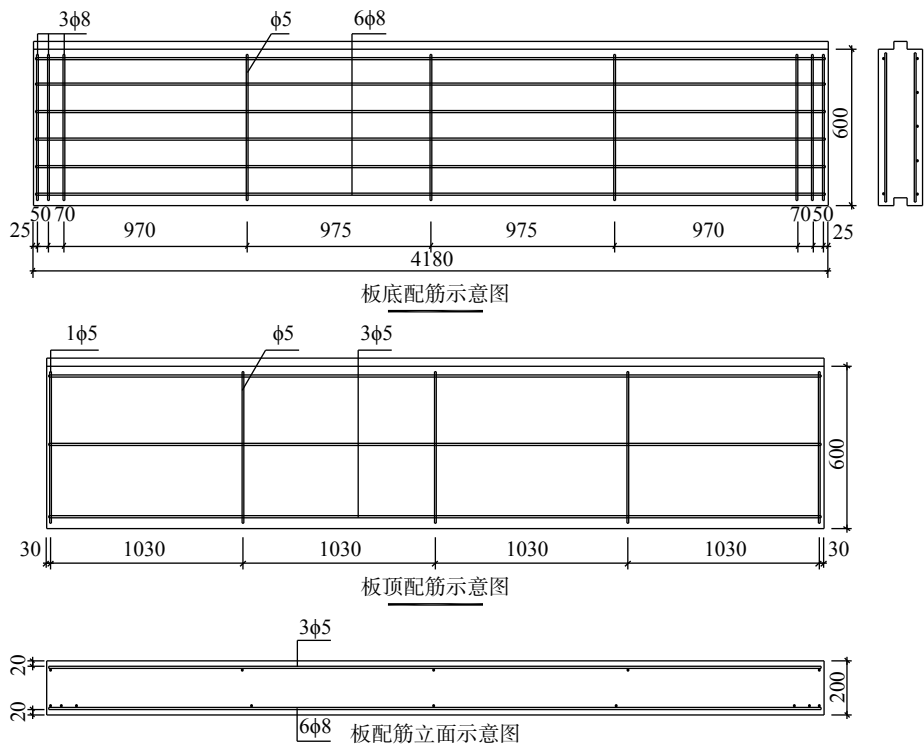


图 1 试验板材配筋图 /mm
Fig. 1 Test plate reinforcement diagram



图 2 测点位置分布图
Fig. 2 Location map of measuring points

2 试验过程

2.1 反拱量测

一般的加气混凝土板都是非对称配筋的，受拉和受压钢筋总面积的重心离开截面重心下移。

受拉区混凝土建立的预压应力大大提高了板的抗裂弯矩，钢筋降温时对加气混凝土截面产生偏心压力，引起构件产生反拱。加气混凝土板的自应力状态显然对于板的受力性能是很有利的。板的反拱抵消了荷载作用下的部分挠度，减小板的总变形。试验时蒸压加气混凝土板的实测反拱值为 2 mm~3 mm，如图 4 所示。

2.2 自应力量测

2.2.1 试验前准备

本试验采用配置 HPB300 钢筋的蒸压加气混凝土板做钢筋的自应力试验，板的尺寸为 4200 mm×600 mm×200 mm。试验前需要按照图 2 测点位置分布图所示在蒸压加气混凝土板上开槽并在钢筋上粘贴应变片。图 5 即为实际开槽后的图片。

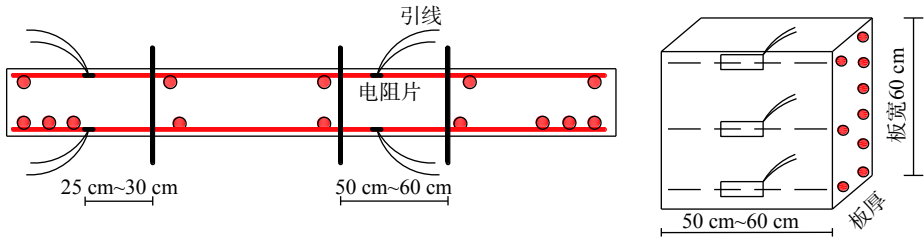


图 3 释放法测钢筋自应力的示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the self-stress of the steel bar by the release method



图 4 反拱的量测

Fig. 4 Measurement of the reverse arch



图 5 蒸压加气混凝土板开槽

Fig. 5 Slotting of autoclaved aerated concrete slab

2.2.2 第一次量测自应力

试验开始前, 先将每一个应变片的位置都做好标记, 再将其连接在应变仪上, 调整仪器, 使所有数据都清零。试验开始后要在贴应变片的凹槽附近用板材切割机将其切成 50 cm~60 cm 的一段板材, 记录应变仪的数据变化。第一次应力释放后, 静置 10 min 待钢筋不再变形后, 记录应变仪数据作为第一次释放的应力值。如图 6 所示。



图 6 第一次释放自应力

Fig. 6 First release of self-stress

2.2.3 第二次量测自应力

然后用凿子和锥子轻轻地剔除钢筋周围的加气混凝土, 整个过程中要注意对钢筋和应变片的保护, 最后将每一截钢筋都取出来, 静置 10 min 后, 观察应变仪的数据变化, 记录最终值, 作为总的自应力值。试验过程如图 7 所示。

3 试验结果

通过实测钢筋应变值经过计算得到最终的应力值如表 1 所示 (钢筋弹性模量取 $E=2.1\times10^5$ MPa)。



图 7 第二次释放自应力

Fig. 7 Second release of self-stress

表 1 钢筋自应力实测值

Table 1 Measured self-stress of steel bar

编号	部位	初次释放后 应力值/MPa	总应力值/ MPa	均值/ MPa	初值/ 总值/(%)	备注
1		144.06	203.07		70.94	
2	跨中受 压区	39.90	158.76	171.50	25.13	
3		90.51	152.67		59.28	
4	端部受 压区	67.41	53.55		125.88	应变片 损坏
5		77.07	137.13	95.34	56.20	
6		65.52	68.67		95.41	
7	端部受 拉区	36.75	67.60		54.36	应变片 损坏
8		77.28	110.67	78.70	69.83	
9		50.82	67.83		74.92	
10		41.58	94.92		43.81	
11		36.96	97.86		37.77	
12	跨中受 拉区	44.52	117.60		37.86	
13		19.32	23.52	93.35	82.14	应变片 损坏
14		30.45	97.02		31.39	
15		47.67	129.15		36.91	

经过整理计算可得每个测点所对应钢筋的自应力及其在蒸压加气混凝土板上的位置分布如图 8 所示。从图 8 和表 1 钢筋自应力实测值可以看出:

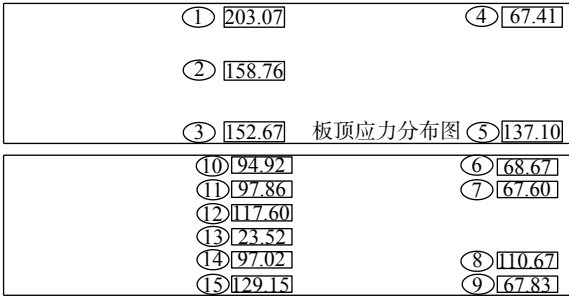


图 8 自应力及应变片位置分布 /MPa

Fig. 8 Position distribution of self-stress and strain gauge

1) 试验过程中测得首次切断板材时 (取 50 cm~60 cm 的一段板材) 钢筋释放自应力与最终的总自应力值差距较大, 约为总应力值的 25%~75%, 具体情况如下:

① 蒸压加气混凝土板受拉侧：跨中受拉区首次切断板材时释放的自应力平均约为总自应力的 37%，而在板端受拉区首次释放的自应力平均约为总自应力的 65%；

② 蒸压加气混凝土板受压侧，跨中受压区首次切断板材时释放的自应力平均约为总自应力的 48%，而在板端受压区首次释放的自应力平均约为总自应力的 56%。由此可以看出切割位置以及蒸压加气混凝土对钢筋的约束长度不同对蒸压加气混凝土板首次释放的自应力值都有一定的影响。

2) 蒸压加气混凝土板受拉区与受压区自应力对比：

① 蒸压加气混凝土板跨中受压区平均应力值为 171.5 MPa，跨中受拉区平均应力值为 93.35 MPa，跨中受拉区自应力约为受压区自应力的 54%；

② 端部受压区平均应力值为 95.34 MPa，端部受拉区平均应力值为 78.7 MPa，板端受拉区自应力约为受压区的 83%。

由此可知板顶受压区的自应力均高于板底受拉区的自应力，是由于蒸压加气混凝土板制作完成后存在反拱现象，板顶受压区钢筋的形变量大于板底受拉区钢筋的形变量，所以导致板顶受压区的自应力均高于板底受拉区自应力。

3) 蒸压加气混凝土板同侧板端自应力与跨中自应力的关系：

① 从表 1 可知蒸压加气混凝土板受压区板端自应力约为跨中自应力值的 56%；

② 受拉区板端自应力约为跨中自应力值的 84%。

由此可知板端钢筋的自应力均低于跨中钢筋的自应力，是由于蒸压加气混凝土板在板端配有锚固筋，锚固筋限制了板中纵筋的形变，从而导致板端自应力均小于跨中自应力。

4 自应力对开裂弯矩及承载力的影响

以与自应力试验相同设计参数的蒸压加气混凝土板的荷载试验为例，分析验证自应力对蒸压加气混凝土板开裂弯矩的影响。

一般的加气混凝土板都是非对称配筋的，受拉和受压钢筋总面积的重心离开混凝土截面重心下移。钢筋降温时对加气混凝土截面产生偏心压力，截面预应力分布如图 9 所示。

降温后截面上距离截面形心 y_0 的加气混凝土

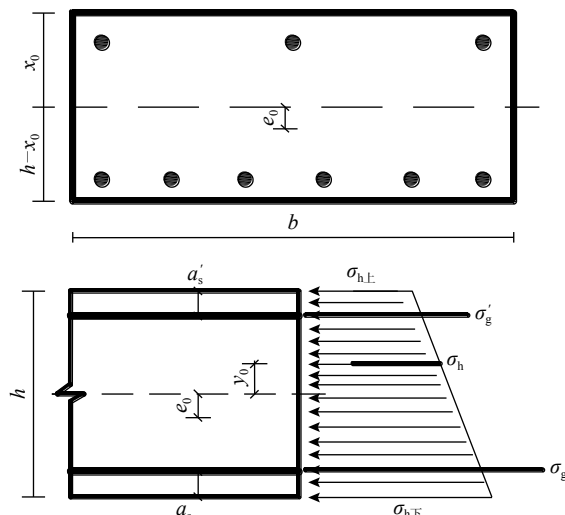


图 9 自应力分析

Fig. 9 Self-stress analysis

的预压应力为：

$$\sigma_h = (A_s + A'_s)\sigma_{g0}\left(\frac{1}{A_0} \pm \frac{e_0 y_0}{I_0}\right) \quad (1)$$

$$\sigma_{g0} = \varepsilon_{g0} E_g = (\alpha_g - \alpha_h)(t_1 - t_2) E_g \quad (2)$$

板底面的预压应力值为：

$$\sigma_{hF} = (A'_s + A_s)\sigma_{g0}\left(\frac{1}{A_0} + \frac{e_0(h - x_0)}{I_0}\right) \quad (3)$$

其中：

$$x_0 = \frac{bh \cdot h/2 + \alpha_E [A_s(h - a_s) + A'_s a'_s]}{A_0} \quad (4)$$

$$e_0 = h - x_0 - \frac{A_s a_s + A'_s(h - a'_s)}{A_s + A'_s} \quad (5)$$

$$I_0 = \frac{b[x_0^3 + (h - x_0)^3]}{3} + \alpha_E [A_s(x_0 - \alpha_s)^2 + A'_s(h - x_0 - \alpha'_s)^2] \quad (6)$$

$$A_0 = (\alpha_E - 1)(A_s + A'_s) + bh \quad (7)$$

$$\alpha_E = \frac{E_s}{E_C} \quad (8)$$

式中： σ_{g0} 为相对蒸压加气混凝土应变为零时钢筋的相对应力； A_0 为蒸压加气混凝土板的等效截面面积； I_0 为蒸压加气混凝土板的等效惯性矩； x_0 为折算截面重心轴至板压区边缘距离； e_0 为折算截面重心轴至钢筋总面积重心距离； y_0 为折算截面重心轴到计算应力位置距离。

根据已有资料的研究，自应力可以抵抗的开裂 M_{crz} 按照式 (9) 计算：

$$M_{crz} = \sigma_{h下} \frac{I_0}{h - x_0} \quad (9)$$

由同济大学顾祥林^[12]在《混凝土结构基本原理》中提出,开裂时混凝土的拉应力很小,故当受拉区边缘加气混凝土应力达到极限抗拉强度 f_t 后,受拉区的加气混凝土强度假设为矩形,由此可得开裂弯矩的理论计算公式为:

$$M_{cr}^{c1} = f_t b (h - x_0) \left(\frac{h - x_0}{2} + \frac{2}{3} x_0 \right) + \sigma_g A_s \left(h_0 - \frac{x_0}{3} \right) + \sigma'_g A'_s \left(\frac{x_0}{3} - a'_s \right) \quad (10)$$

式中:

$$\sigma_g = \partial_E f_t \frac{h_0 - x_0}{h - x_0}, \quad \sigma'_g = \partial_E f_t \frac{x_0 - a'_s}{x_0}$$

经过计算得出未考虑自应力时蒸压加气混凝土的理论开裂弯矩值为 2.16 kN·m

因此,考虑自应力的开裂弯矩计算值 M_{cr}^{c2} 可按式(11)计算:

$$M_{cr}^{c2} = M_{crz} + M_{cr}^{c1} \quad (11)$$

式中: M_{cr}^{c2} 为蒸压加气混凝土板考虑自应力后的开裂弯矩理论计算值; M_{crz} 为自应力抵抗的开裂弯矩值; M_{cr}^s 为蒸压加气混凝土板开裂弯矩试验值。

由表2的计算结果可以得出:

1) 考虑自应力以后蒸压加气混凝土板的开裂弯矩约为试验值的 88.9%,符合预期设计要求。

2) 自应力所能抵抗的开裂弯矩占理论开裂弯矩的 65.7%,说明在蒸压加气混凝土板中自应力的抗裂效果比较好,而且也体现出自应力在蒸压加气混凝土板的实际应用与发展中占有重要作用。

表2 考虑自应力的开裂弯矩

Table 2 Cracking moment considering self stress

板编号	$M_{crz}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{cr}^{c1}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{cr}^{c2}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{cr}^s/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{cr}^{c2}/M_{cr}^s/(\%)$
B1-1#	4.14	2.16	6.3	7.09	88.9

5 结论

运用释放法量测蒸压加气混凝土板内钢筋自应力,并通过计算蒸压加气混凝土板的开裂弯矩理论值与试验值进行对比可以得到以下结论:

(1) 试验通过释放法测板内钢筋自应力,测得首次切断板材钢筋释放自应力与最终的总自应力值差距较大,约为总应力值的 25%~75%。由试验

结果分析知切割位置对板首次释放的自应力值有一定的影响,其中板端首次释放的自应力均高于跨中释放的自应力值。

(2) 因为蒸压加气混凝土板在板端配有锚固筋,锚固筋限制了板中纵筋的形变,以及蒸压加气混凝土对钢筋的约束长度不同,从而导致板端自应力值均小于跨中自应力值。通过试验数据也证明了蒸压加气混凝土板受压区板端自应力值约为跨中自应力值的 56%;受拉区板端自应力值约为跨中自应力值的 84%。

(3) 由于蒸压加气混凝土板制作完成后存在反拱现象,板顶受压区钢筋的形变量大于板底受拉区钢筋的形变量,因此蒸压加气混凝土板跨中受拉区自应力值约为受压区自应力的 54%;板端受拉区自应力约为受压区的 83%,即板顶受压区的自应力均高于板底受拉区的自应力。

(4) 考虑自应力以后蒸压加气混凝土板的开裂弯矩约为试验值的 88.9%,符合预期设计要求。而自应力所能抵抗的开裂弯矩占理论开裂弯矩的 65.7%,说明在蒸压加气混凝土板中自应力的抗裂效果比较好。试验证明蒸压加气混凝土板中钢筋自应力对提高板的抗裂能力有很大作用,合理有效地利用钢筋中的自应力有助于蒸压加气混凝土板的推广与应用。

参考文献:

- [1] Yang H W. Exterior wall thermal insulation technology and application of building energy-saving materials [J]. Construction & Design or Engineering, 2017(11): 41 — 42, 45.
- [2] Peng J, Peng X. A review on structure and properties of aerated concrete [J]. Materials Review, 2011, 25(1): 89 — 93.
- [3] 陈海燕. YTONG加气混凝土矩形和异形屋面板试验研究YTONG轻质填充墙-钢筋混凝土框架连接抗震性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2002.
Chen Haiyan. Experimental study on YTONG aerated concrete rectangular and irregular roof panels YTONG lightweight infill wall-reinforced concrete frame connection seismic behavior [D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese)
- [4] Getz D R, Memari A M. Static and cyclic racking performance of autoclaved aerated concrete cladding panels [J]. Journal of Architectural Engineering, 2006, 12(1): 12 — 23.

(参考文献 [5]—[12] 转第 339 页)