

3 层铁杉正交胶合木板结构的力学性能计算与分析

卢 尧¹,李敏敏¹,王 正^{1*},高子震¹,王建和²

(1.南京林业大学 材料科学与工程学院,江苏 南京 210037;2.宁波中加低碳新技术研究院,浙江 宁波 315600)

摘 要:根据实际工程需要,对足尺铁杉 3 层 CLT 板的单元结构进行了力学性能计算与分析。一方面,通过运用机械组合梁理论,对铁杉 3 层 CLT 板的有效弯曲刚度和弯曲强度等力学性能进行预测计算;另一方面,依据其计算结果对铁杉 3 层 CLT 板在实际工程应用中的挠度、所承受的弯矩和振动固有频率等结构性能进行了预测研究。结果表明,2 个等级的 CLT 有效弯曲刚度、抗弯强度和振动性能等结构力学性能均能满足实际工程应用需要。上述以期通过对足尺 3 层 CLT 板的单元结构的力学性能设计计算与分析,有助于为我国大幅面装配式重型木结构建筑提供合适和可靠的配套墙板和楼板。

关键词:铁杉;正交胶合木;机械组合梁理论;力学性能;计算与分析

中图分类号:S781.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)06-0231-05

Calculation and Analysis of Mechanical Properties of Three Layers Cross-laminated Timber of Full-size Hemlock

LU Yao¹,LI Min-min¹,WANG Zheng^{1*},GAO Zi-zhen¹,WANG Jian-he²

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;

2. Ningbo China & Canada Carbon New Technology Research Institute, Ningbo, Zhejiang 315600, China)

Abstract: According to the needs of practical engineering, the mechanical properties of the unit structure of the three-layer cross-laminated timber (CLT) board of full-size hemlock were calculated and analyzed. By using the mechanical composite beam theory, the mechanical properties such as effective bending stiffness and bending strength of the three-layer CLT plate were predicted and calculated. Based on the calculation results, the structural performance of the three-layer CLT slab in actual engineering applications such as deflection, moment of bending and natural frequency of vibration was predicted. The results showed that the two grades of CLT could meet the practical application needs, such as effective bending stiffness, bending strength and vibration performance. The calculation and analysis on the mechanical properties of full-size three-layer CLT plate structure would help to provide suitable and reliable supporting wall panels and floor in the large-scale assembly of heavy-duty timber buildings.

Key words: hemlock; cross-laminated timber; mechanical composite beam theory; mechanical properties; calculation and analysis

木材作为一种历史悠久的可再生天然材料,广泛应用于木材工业的各个方面。由于木材受其各向异性以及各种缺陷因素制约,各项力学性能均存在较大的变异性和不确定性。因此,木材作为建筑材

料应用于工程领域时,必须首先对其进行材质应力分等,以确保所用木材的各项力学性能满足工程质量需求。正交胶合木(CLT)则成为了建筑材料领域的新宠。目前,CLT 通常采用工厂预制的方式进行

收稿日期:2018-01-11 修回日期:2018-02-27
基金项目:2017 年江苏省林业科技创新与推广项目“基于原木分等的机电产品包装单板层积材制造、检测与应用技术”(LYKJ[2017]41)。
作者简介:卢 尧,男,在读硕士,研究方向:木结构建筑无损检测技术。E-mail:332102455@qq.com
* 通信作者:王 正,男,博士,高工,研究方向:木结构建筑无损检测技术。E-mail:wangzheng63258@163.com

生产,根据结构设计的需要在工厂进行精确的加工,例如:在 CLT 生产的流水线上进行窗或门的裁切和加工。这种生产方式极大地提高了现场施工的效率,降低了施工的成本,减小了施工现场粉尘和噪音等污染。在中高层建筑中,高层建筑工厂预制和简单快捷的安装方法使得建筑的施工时间大大缩短,这是 CLT 应用于建筑的主要优势之一^[1-4]。上世纪 90 年代,欧洲的德国和奥地利率先开始了对 CLT 的研究和推广工作。迄今,CLT 在欧洲已广泛用于中高层民用和非民用建筑。近年来,加拿大、美国和日本等国家也先后开始了对 CLT 板乃至 CLT 建筑的研究与应用,并取得了阶段性的丰硕成果。目前,欧洲和加拿大地区已对 CLT 进行了相对成熟的系统研究,特别是对 CLT 力学性能和在建筑领域应用的研究做了大量工作。另外,在临时道路、城市化交通建设中的应用和 CLT 板的环境特性等方面,也有相关的工程实例和试验研究成果^[5]。加拿大 FPIInnovation 公司对以加拿大 SPF 为基材的 CLT 的加工工艺和各项性能指标进行了相应的系统的研究,并于 2012 年出版了《CLT 手册》。这其中包括 CLT 板的结构设计、生产加工及各项工艺参数、各项力学性能的预测计算和测试方法、环境特性以及 CLT 建筑的抗震性能、防火性能等各个方面技术内容^[6]。奥地利 TUG 大学木材材料实验室 Bogensperger 等人对 CLT 板的面内剪切强度和剪切刚度进行了研究,其研究表明,CLT 弯曲和面内剪切性能优于传统层板胶合木产品^[7]。加拿大 UBC 大学对 CLT 板的弯曲性能和连接件的结构性能开展了专项研究。研究表明,CLT 在受到弯曲载荷时,其抗弯性能受木材密度、胶合强度以及木材横纹剪切强度等因素的影响^[8]。加拿大 UNB 大学 Chui^[9]等通过横向振动法,对 CLT 板的主强度方向和次强度方向上的弯曲弹性模量及其面内剪切模量

进行了测试研究,创立了一种可用于 CLT 线上质量分等的无损检测方法。但欧洲、加拿大学者的对 CLT 的研究多集中于欧洲赤松、SPF、云杉等树种。针对加拿大西部铁杉作为基材的研究工作则相对较少,并没有进行过系统的测试和分析。加拿大西部铁杉广泛生长于加拿大 BC 省沿海林区,资源丰富。在制备 CLT 时,相较于 SPF 等树种,铁杉木材与其有着相同的结构设计、加工工艺方法,但铁杉木材还具有有效弯曲刚度、抗弯强度和振动性能等力学性能较高,价格低廉等性价比高的优势。据上海木材交易中心数据显示,加拿大铁杉 II 级规格材相较于相同等级 SPF,价格较低 10% 左右。然而,西部铁杉目前大多应用于造纸、胶合板生产等低附加值产业当中,其价值尚未得到充分体现^[10]。鉴于此,文中对由我国宁波中加低碳新技术研究院有限公司生产的足尺铁杉 CLT 板进行了单元结构设计及其性能计算分析。通过运用机械组合梁理论对铁杉 CLT 板的有效弯曲刚度和弯曲强度等力学性能进行预测计算,并依据计算结果对其在实际工程应用中的挠度、所承受的弯矩和振动固有频率等结构性能进行了预测研究。研究表明,2 个等级的铁杉 CLT 有效弯曲刚度、抗弯强度和振动性能等结构力学性能均满足实际工程应用需要。

1 材料与方法

1.1 试验材料

文中 CLT 以跨度为 4 m 的 2 层 CLT 示范建筑房为设计基础。因此所用的 CLT 板采用 3 层单元结构,每层单元厚度为 35 mm,分为等级 I 和等级 II 2 个性能等级进行设计,分别用于示范建筑的墙板和楼板;所设计 CLT 成板尺寸为 5 500 mm × 1 200 mm × 105 mm,其单元结构组成如图 1 所示。

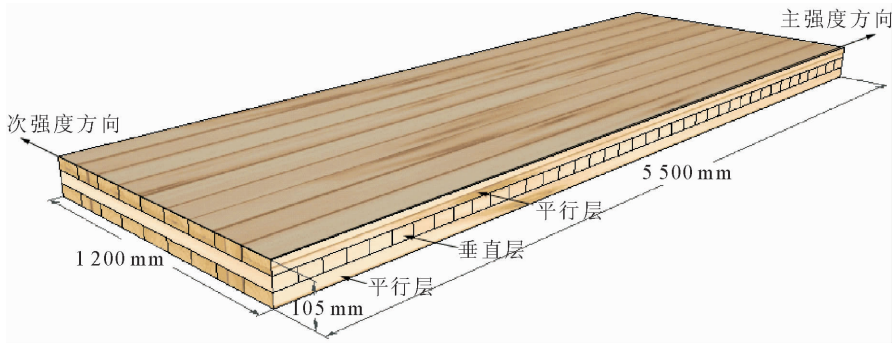


图 1 3 层 CLT 板结构示意图

Fig. 1 Three layer CLT structure diagram

根据本 CLT 2 层示范建筑房实际工程需要,从各等级铁杉规格材中随机挑选分别用于各等级

CLT 的加工和制造,其中等级 1(制造楼板用)和等级 2(制造墙体用)CLT 各 3 块。挑选完成后,采用

横向振动法对铁杉规格材的弹性模量进行测试,得到各 CLT 板材所用的铁杉规格材性能指标如表 1 所示^[4]。测试完成后,在本批次铁杉规格材中随机抽取 15 根样本,采用横向振动法对其横纹剪切模量进行测试,测试结果如表 2 所示^[11]。

1.2 试验方法

1.2.1 铁杉 CLT 板弯曲性能预测方法 在计算 CLT 有效抗弯刚度时,依据机械组合梁理论,将垂

直层单元简化为连接上下 2 层平行层的界面,并且在实际计算时将横向剪切效应的影响考虑在内,更符合实际工程应用中的 CLT 受力条件。将 CLT 横向剪切效应考虑在内后,其有效弯曲刚度与单元锯材弹性模量的关系符合式(1)^[6]。加拿大 UNB 大学周建徽等人针对此计算方法应用于 CLT 性能预测的准确性进行了系统的分析和验证,确定了此方法的准确性^[12]。

表 1 CLT 所用铁杉规格材性能参数

Table 1 Performance parameters of hemlock for CLT

CLT 编号	CLT 等级	平行层 MOE/MPa	标准偏差 /MPa	变异系数 /%	垂直层 MOE/MPa	标准偏差 /MPa	变异系数 /%	平均密度 /(kg·m ⁻³)
1	I	13 155	2 684	20.40	7 972	1 971	24.72	493
2	I	12 571	2 059	16.38	8 313	1 679	20.20	492
3	I	12 134	1 753	14.45	6 889	1 299	18.86	483
4	II	10 970	1 186	10.81	6 899	1 469	21.29	484
5	II	10 916	1 174	10.75	8 071	1 089	13.49	475
6	II	10 634	1 363	12.82	7 211	937	12.99	498

表 2 铁杉横纹剪切模量测试结果

Table 2 Hemlock cross-section of the shear modulus test results

试件编号	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_R/MPa	G_R/MPa
1	530.31	641.52	51.37
2	506.13	535.74	46.92
3	633.98	632.55	75.25
4	523.95	441.79	52.69
5	522.20	509.16	63.02
6	545.30	519.52	49.94
7	510.85	317.73	47.85
8	509.98	314.63	49.01
9	510.46	326.08	53.62
10	630.93	698.70	56.45
11	525.53	486.63	42.30
12	521.64	524.6	41.11
13	509.27	341.49	52.52
14	507.74	318.86	49.57
15	504.42	326.61	41.62
平均值		462.38	51.55
标准偏差		132.99	8.72
变异系数		29%	17%

式中, l 为 CLT 跨度(mm); b 为 CLT 宽度(mm); h 位 CLT 单元厚度(mm); G_R 为铁杉规格材横纹剪切模量(MPa)。

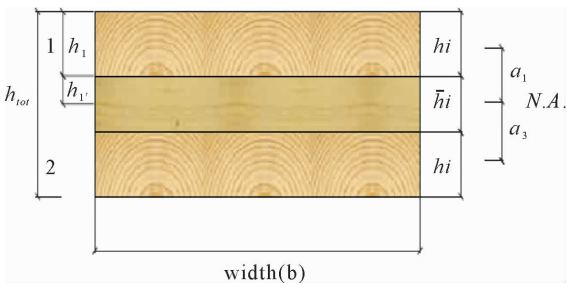


图 2 3 层结构 CLT 截面示意图

Fig. 2 Three-layer structure CLT section

依据加拿大木结构规范 CSA O86 所规定的相关木结构规格材抗弯强度特征值,本文中等级 II 铁杉规格材抗弯强度特征值取 23.9 MPa,等级 III 铁杉规格材抗弯强度特征值取 34.7 MPa^[13]。CLT 跨度取 4 m,宽度取 1 m。根据相关理论,CLT 抗弯强度性能与其平行层铁杉基材的关系符合式(3)。

$$M_r=\varphi F_b \frac{I_{\text{eff}}}{(\gamma_a+0.5h)}$$

(3)

式中, M_r 为 CLT 板所允许承受的最大弯矩(kN/m); F_b 为铁杉规格材弯曲强度特征值(MPa); I_{eff} 为 CLT 有效截面矩(m³); $\varphi=0.9$ 。

1.2.2 铁杉 CLT 板结构性能预测方法 依据实际工程中的楼板的应用情况,在计算实际工程应用中 CLT 的最大挠度时,将 CLT 简化为简支梁模型,因此 CLT 在实际工程应用中,其弯曲挠度值与载荷的关系符合式(4)^[14]。

$$\Delta=\frac{5PL^4}{384EI_{\text{eff}}}$$

(4)

$EI_{\text{eff}}=\sum_{i=1}^{(n+1)/2}(E_iI_i+\gamma_iE_iA_ia_i^2)$ (1)
式中, EI_{eff} 为 CLT 有效弯曲刚度预测值(N·mm²); E_i 为平行层铁杉规格材弹性模量(MPa); A_i 为 CLT 单层截面积(mm²); I_i 为 CLT 单层截面矩(mm³); n 为 CLT 单元层数; a_i 为平行层厚度的 1/2 与垂直层厚度的 1/2 之和,即为单元厚度; γ_i 为横纹剪切模量的相关系数,其具体关系式符合式(2)。

$$\gamma_i=\frac{1}{1+\pi^2\cdot\frac{E_i\cdot A_i}{l^2}\cdot\frac{\bar{h}_i}{G_R\cdot b}}$$

(2)

式中, Δ 为实际工程应用中 CLT 挠度值(mm); P 为实际工程应用中单位长度 CLT 所承受的载荷值(kN·m); L 为实际工程应用中 CLT 的跨度(mm); EI_{eff} 为 CLT 有效弯曲刚度预测值(N·mm)。

依据实际工程中的楼板的应用情况,在计算实际工程应用中 CLT 所承受的最大弯矩时,将 CLT 简化为简支梁模型。因此 CLT 所承受的最大弯矩与载荷的关系符合式(5)^[15]。

$$M_{max}=\frac{PL^2}{8}$$

(5)

式中, M_{max} 为实际工程应用中 CLT 的最大弯矩(kN·m); P 为实际工程应用中 CLT 所承受的载荷值(kN); L 为实际工程应用中 CLT 的跨度(mm)。

CLT 在实际工程应用中,其振动性能是表征楼板稳定性的重要性能之一。目前,国外一般通过对 CLT 振动固有频率值来评价 CLT 的振动性能。依据实际工程中的楼板的应用情况,在计算 CLT 振动固有频率时,将 CLT 简化为简支板模型。因此 CLT 的振动固有频率与 CLT 的有效抗弯刚度的关系符合式(6)^[16-17]。

$$f=\frac{\pi}{2l^2}\sqrt{\frac{EI_{eff}}{\rho A}}$$

(6)

式中, f 为实际工程应用中 CLT 的振动固有频率值(Hz); l 为实际工程应用中 CLT 的跨度(mm); ρ 为 CLT 的密度(kg/m³); EI_{eff} 为 CLT 有效弯曲刚度值(N·m²)。

2 结果与分析

2.1 铁杉 CLT 板的抗弯性能预测结果与分析

对铁杉 CLT 板的结构性能预测计算中,其锯材弹性模量取表 1 中所示各 CLT 平行层所用的铁杉规格材的弹性模量平均值,而横纹剪切模量取表 2 中铁杉规格材横纹剪切模量测试结果的平均值。将

上述各 CLT 所用的锯材的参数值代入式(1)和式(3)中,算得各 CLT 的有效弯曲刚度和抗弯强度等性能的预测值,如表 3 所示。

通过表 3 分析得知,等级 I CLT 的有效弯曲刚度平均值为 1 003.3×10⁹ N·mm²,达到北美 ANSI APA PRG320-2012 标准 E2 等级所要求的 958×10⁹ N·mm²。等级 II CLT 的有效弯曲刚度平均值为 879.5×10⁹ N·mm²,达到北美 ANSI APA PRG320-2012 标准 E2 等级所要求的 772×10⁹ N·mm²^[18]。2016 年,爱尔兰国立大学 Sikora 等人针对单元厚度为 40 mm 的西加云杉 CLT 进行了测试,其有效弯曲刚度为 823.7×10⁹ N·mm²。与本文预测数据对比可以看出,加拿大西部铁杉 CLT 弯曲性能优于西加云杉 CLT^[19]。

表 3 CLT 结构性能预测结果

Table 3 CLT structural performance prediction results

CLT 编号	$EI_{eff}/(10^9\text{ N}\cdot\text{mm}^2)$	$M_r/(\text{kN}\cdot\text{m})$
1	1 039.7	45.84
2	1 000.1	46.15
3	970.0	46.34
4	888.8	33.19
5	884.9	33.21
6	864.8	33.32

2.2 铁杉 CLT 板的工程性能预测结果与分析

根据实际工程需要,本文所述 CLT 模拟应用于跨度为 4 m 的 2 层装配式 CLT 建筑中。取活载荷载荷为均布载荷 2 kN,固定载荷为 CLT 板材自重^[15]。

将表 3 中有效弯曲刚度预测值和实际工程中 CLT 所承受的载荷值分别代入式(4)、式(5)和式(6)中进行计算并进行分析,即得 CLT 在实际工程应用中的最大挠度、所承受的最大弯矩值以及 CLT 振动固有频率值,如表 4 所示。

表 4 CLT 结构性能分析结果

Table 4 CLT structural performance analysis results

CLT 编号	固定载荷 /kN	活载荷 /kN	挠度 /mm	M_{max} /(kN·m)	M_r /(kN·m)	振动基频 /Hz
1	0.52	2.0	8.07	20.14	45.84	13.92
2	0.52	2.0	8.39	20.13	46.15	13.66
3	0.51	2.0	8.62	20.06	46.34	13.58
4	0.51	2.0	9.41	20.07	33.19	12.98
5	0.50	2.0	9.41	19.99	33.21	13.08
6	0.52	2.0	9.72	20.18	33.32	12.63

由表 4 可知,在设计载荷条件下,6 块足尺 CLT 板试件的挠度预测值均小于实际工程应用中跨度的 1/360,符合建筑设计的要求。且 6 块 CLT 所承受的最大弯矩(M_{max})均远小于 CLT 所能承受的最大

弯矩预测值(M_r)。

等级 I CLT 一阶固有频率的平均值为 13.72 Hz,等级 II CLT 一阶固有频率的平均值为 12.90 Hz。依据加拿大 FPIInnovation 公司的测试

结果,以 SPF 作为单元的 CLT 楼板的振动频率在 9~15 Hz。轻质木托梁结构楼板的振动频率在 15 Hz 以上,钢筋混凝土结构楼板的振动频率一般<9 Hz^[6]。从 2.2 中 CLT 楼板的振动性能预测结果来看,铁杉 CLT 的振动性能与目前加拿大常见的以 SPF 为基材的 CLT 结构楼板相一致,明显优于轻质木托梁结构楼板。由此可得,本文所提供的铁杉 CLT 结构设计方案中,CLT 的有效弯曲刚度、抗弯强度和振动性能等结构性能满足实际工程应用的需要。

3 结论与讨论

1)本文所设计 2 个等级 CLT 中,等级 I CLT 的有效弯曲刚度平均值为 $1\,003.3\times10^9\text{ N}\cdot\text{mm}^2$,达到加拿大 ANSI APA PRG320-2012 标准 E2 等级所要求的 $958\times10^9\text{ N}\cdot\text{mm}^2$;等级 II CLT 的有效弯曲刚度平均值为 $879.5\times10^9\text{ N}\cdot\text{mm}^2$,达到加拿大 ANSI APA PRG320-2012 标准 E2 等级所要求的 $772\times10^9\text{ N}\cdot\text{mm}^2$ 。

2)在设计载荷条件下,6 块 CLT 试件的挠度值均小于实际工程应用中跨度的 1/360,符合建筑设计的要求。6 块 CLT 所承受的最大弯矩均远远小于 CLT 所能承受的最大弯矩预测值;

3)等级 I CLT 一阶固有频率的平均值为 13.72 Hz,等级 II CLT 一阶固有频率的平均值为 12.90 Hz。就 CLT 结构性能预测结果而言,文中所设计铁杉 CLT 的有效弯曲刚度、抗弯强度和振动性能等结构性能均能满足实际工程应用的需要。

参考文献:

[1] 龚迎春,任海清. 正交胶合木的特性及发展前景[J]. 世界林业研究,2016(3):71-74.
GONG Y C,REN H Q. Characteristics and development prospects of orthogonal plywood[J]. World Forestry Research, 2016(3):71-74. (in Chinese)

[2] 曹瑜,王韵璐,王正,等. 国外正交胶合木(CLT)建筑技术的发展与展望[J]. 林产工业,2016,13(12):3-7.
CAO Y,WANG Y L,WANG Z,*et al.* Application and research progress of overseas cross-laminated timber construction[J]. China Forest Products Industry,2016,13(12):3-7. (in Chinese)

[3] 朱晓冬,何鑫巍,刘玉. GFRP 加固木结构规格材抗弯力学性能及可靠性研究[J]. 西北林学院学报,2014,29(5):181-185.
ZHU X D,HE X W,LIU Y. Reliability of GFRP reinforced wooden structure lumber[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(5):181-185.

[4] 王韵璐,王正,王建和. 国内外新一代重型 CLT 木结构建筑技术的研究进展[J]. 西北林学院学报,2017,32(2):286-293.
WANG Y L,WANG Z,WANG J H. Research progress of the new generation of heavy CLT wood structure building technology[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32 (2):286-293. (in Chinese)

[5] HAN-MIN P,MASAMI F,HEE-SEOP B. Static bending strength Performances of cross laminated woods made with five species [J]. Journal of Wood Science,2003,49(5):411-417.

[6] SYLVAIN G E M. CLT Handbook: cross-laminated timber [M]. U. S. A:FP Innovation [L5],2012.

[7] THOMAS B,THOMAS M,GREGOR S. Verification of CLT-plates under loads in plane[R]. WCTE: World conference on timber engineering,Riva del Garda,Italy,2010.

[8] FRANK L,JESSIE Y C. Development of thick Laminated MPB wood plates[R]. The University of British Columbia,2007.

[9] ZHOU J H,CUI Y H. Elastic properties of full-size mass timber panels: Characterization using modal testing and comparison with model predictions[J]. Composites Part B. ,2017,112 (3):203-212.

[10] WANG B J,DAI C. Development of structural laminated veneer lumber from stress graded short-rotation hem-fir veneer [J]. Construction and Building Materials,2013,47:902-909.

[11] 高子震,王正,张鲜,等. 西加云杉木材音板剪切模量的频率法测试分析[J]. 林产工业,2016,43(2):23-26.
Gao Z Z,WANG Z,ZHANG X,*et al.* The frequency method for measurement and evaluation of shear modulus of *Picea sitchensis* soundboard [J]. China Forest Products Industry, 2016,43(2):23-26. (in Chinese)

[12] ZHOU J H,CUI Y H,GERHARD S. Elastic constants of cross laminated timber panels of industrial size; non-destructive measurement and verification[C]//World Conference on Timber Engineering. Vienna Austria,2016.

[13] CSA O86-14. Engineering design in wood [S]. Toronto Ontario:Canadian Standards Association,2014.

[14] 范钦珊,殷雅俊,唐靖林. 材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2015.

[15] GB 50005-2003. 木结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.

[16] 傅志方. 振动模态分析与参数识别[M]. 北京:机械工业出版社,2002.

[17] 提摩盛科. 机械振动学[M]. 北京:机械工业出版社,1965.

[18] ANSI/APA PRG 320-2012. Standard for performance-rated cross-laminated timber [S]. Tacoma: APA-the Engineered Wood Association,2012.

[19] KAROL S,DANIEL O,ANNETTE M. Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear[J]. Construction and Building Materials,2016,116(7),141-150.