

粉煤灰和炉渣改性生土坯抗压性能试验

徐春一^{1,2}, 余希¹, 李胜东¹, 马建飞³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳大学博士后科研工作站, 辽宁 沈阳 110044;
3. 佳兆业地产(辽宁)有限公司, 辽宁 沈阳 110002)

摘要 目的 研究粉煤灰和炉渣对改性生土坯抗压强度的影响, 确定掺粉煤灰和炉渣改性生土坯的合理配合比, 完善生土建筑规范的基础性工作, 为改性生土坯砌块建筑建造和加固提供理论数据. 方法 对不同质量配合比的单掺粉煤灰、单掺炉渣和混掺粉煤灰、炉渣的改性生土坯进行抗压试验. 结果 随着改性材料掺量增大, 单掺粉煤灰、单掺炉渣改性生土坯抗压强度呈增大趋势, 其平均抗压强度最大值分别为 3.99 MPa 和 4.57 MPa; 混掺改性材料生土坯平均抗压强度大于单掺改性材料的生土坯, 其最大值可达 5.25 MPa, 并随着粉煤灰质量比重增大而减小. 改性生土坯的最优配合比为 $m(\text{黏土}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{炉渣})=0.47:0.24:0.24$. 结论 混掺粉煤灰、炉渣对生土坯抗压强度的改性效果最佳, 单掺炉渣次之, 单掺粉煤灰最差; 按最优配合比制作的改性生土坯, 抗压强度满足自承重墙的空心砖 MU5 强度指标.

关键词 粉煤灰; 炉渣; 黏土; 改性生土坯; 抗压强度

中图分类号 TU521.3 文献标志码 A

Compressive Property of Fly Ash and Slag Modified Adobe

XU Chunyi^{1,2}, YU Xi¹, LI Shengdong¹, MA Jianfei³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Shenyang University, Postdoctoral workstation, Shenyang, China, 110044; 3. Kaisa Real Estate (Liaoning) Co., Ltd., Shenyang, China, 110002)

Abstract: To the effect of fly ash and slag content on compressive properties of modified was studied to determine the mix proportion of modified adobe which improves the basic norms of adobe building work and provide theoretical data for modified adobe masonry building construction and reinforcement. Compression tests of modified adobe made from fly ash, slag or fly ash and slag with different mass ratio were done. Average compressive strength of the mixed materials modified adobe is greater than that of the single material modified. With the increase of single modified material, adobe compressive strength increases, however, with the ratio of fly ash to modified material, adobe compressive strength drops. Fly ash modified adobe maximum compressive strength is

收稿日期:2016-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51408373)

作者简介:徐春一(1983—),女,副教授,博士,主要从事现代砌体结构、新型混凝土结构和预制装配式结构研究.

3.99 MPa. Slag modified adobe maximum compressive strength is 4.57 MPa. Fly ash mix slag modified adobe maximum compressive strength is 5.25 MPa. The best mix proportion of modified adobe is $m(\text{clay}) : m(\text{fly ash}) : m(\text{slag}) = 0.47 : 0.24 : 0.24$. The results show that fly ash mixed slag modified adobe has greatest compressive strength, single fly ash weakest. The compressive strength of the modified adobe with the optimal ratio meet the index of the self load-bearing wall hollow brick with grade MU5.

Key words: fly ash; slag; clay; modified adobe; compressive strength

生土建筑材料历史悠久,是人类历史进程的活化石^[1],凭其绿色环保、保温隔热、易于取材、施工简单及造价低廉等优点,至今在世界各国仍有广阔的应用空间^[2-4].生土材料的抗压强度是生土建筑设计的重要参数,文献[5]对生土建筑的施工、抗震构造措施以及土坯墙体抗剪强度设计值等提出了规范化要求,但未提及单块土坯的抗压强度设计值.陈志寿^[6]对云南地区农村现存的生土坯进行了抗压试验,得到单块生土坯的平均抗压强度仅为0.848 MPa.因此如何提高、改进生土材料的抗压强度成为生土材料的研究热点之一.添加水泥、石膏、石灰等改性材料是提高生土材料抗压强度最有效的手段^[7-8],改性生土墙体材料在国外1~3层的节能环保建筑中较常见^[9-10].N. DEGIRMENCI^[11]利用磷石膏和天然石膏对生土砖进行改性,改性后生土砖的28 d抗压强度提高了4倍.粉煤灰和炉渣土化学组成以硅质和铝质为主,可作为改性材料替代一部分的黏土掺入生土料中^[12-14].为此,笔者对生土坯的抗压性能进行改性研究,进一步提高生

土材料的抗压强度,通过试验结果分析确定掺粉煤灰和炉渣的改性生土砖的合理配合比,进而完善生土建筑规范的基础性工作,为改性材料生土坯砌块建筑建造和加固提供理论数据.

1 试验

1.1 试验原材料

土料中各级粒径颗粒含量会对土坯的抗压性能有着较大影响,细土粒含量过大会导致土坯额外的收缩开裂,含量过小则粘结力不足影响强度^[15],因此选用最大粒径不超过5 mm的黏土,生土主要物理性质如表1所示.工业废渣选用符合《轻集料混凝土技术规程》(JGJ51—2002)规定的粉煤灰和炉渣.黏土、粉煤灰和炉渣的主要化学组成如表2所示.

表1 黏土的物理性质

Table 1 Physical property of clay				%
天然含水率	塑限	液限	塑性指标	
18.6	23.6	42.5	18.9	

表2 黏土、粉煤灰、炉渣的化学成分

Table 2 4 Chemical composition of clay, fly ash and furnace slag

材料	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(MgO)	w(CaO)	w(MnO)	烧失量	%
黏土	64.2	10.4	6.1	1.5	0.7	—	1.86	
粉煤灰	53.79	22.85	14.36	1.09	4.56	—	1.52	
炉渣	33.85	12.25	0.88	9.51	41.54	0.51	1.46	

1.2 试件质量配合比设计

根据改性材料掺料种类的不同,将试验试件分成单掺粉煤灰改性生土砖(记作A试

件)、单炉渣灰改性生土砖(记作S试件)和混掺粉煤灰、炉渣改性生土砖(记作SA试件),根据改性材料掺量不同将每类试件都

分成5组,每组取10个试件用于抗压试验. 50 kg,并按0.5%^[16]的质量比添加稻草,改性生土坯质量配合比见表3.

表3 单掺改性材料生土坯的试验配合比

Table 3 Test mixture ratio of the modified adobes made from single modified material

试件类型	编号	掺量/%				稻草/%	水胶质量比
		黏土	粉煤灰	炉渣	激发剂		
A 试件	A1	63	32	0	5	0.5	0.18
	A2	58	37	0	5	0.5	0.18
	A3	54	41	0	5	0.5	0.18
	A4	51	44	0	5	0.5	0.18
	A5	47	48	0	5	0.5	0.18
S 试件	S1	63	0	32	5	0.5	0.18
	S2	58	0	37	5	0.5	0.18
	S3	54	0	41	5	0.5	0.18
	S4	51	0	44	5	0.5	0.18
	S5	47	0	48	5	0.5	0.18
SA 试件	SA1	47	18	30	5	0.5	0.18
	SA2	47	24	24	5	0.5	0.18
	SA3	47	30	18	5	0.5	0.18
	SA4	47	36	12	5	0.5	0.18
	SA5	47	42	6	5	0.5	0.18

1.3 生土坯试件的制备

由于湿制土坯抗压强度高于干制土坯^[17],所以试验所用试件采用湿塑成型法制作. 试件长宽高为240 mm × 115 mm ×

53 mm,室外搁置至少6 h后拆模. 将有一定强度的生土坯取出坯模,然后将砌块立放,室外条件下自然养护至少28 d后测其抗压强度. 图1为改性生土坯的具体制作过程.

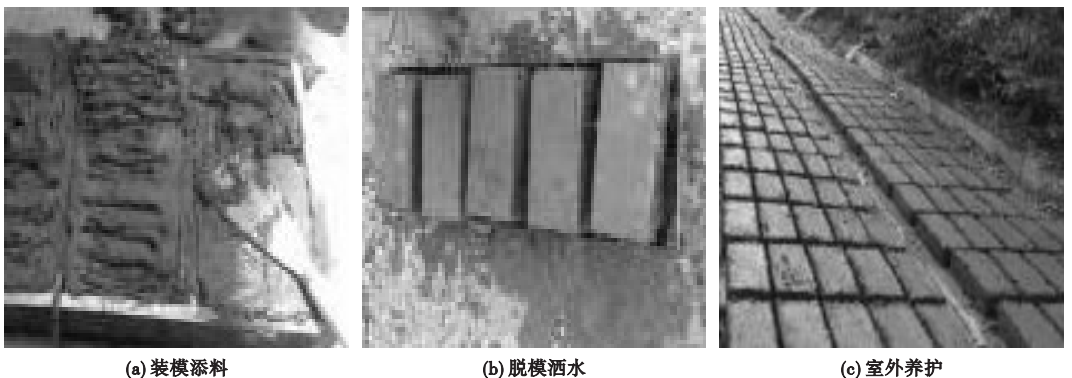


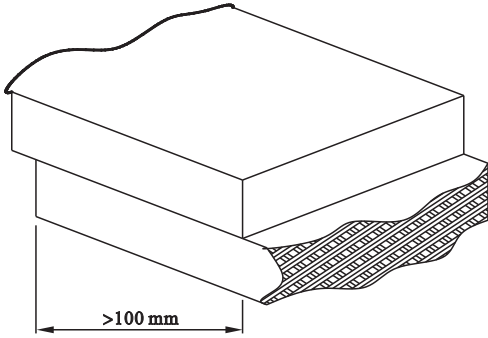
图1 生土坯的制作过程

Fig. 1 Adobe making process

1.4 试验方法

生土坯的抗压试验在沈阳建筑大学力学实验室完成. 生土坯受力状态与砌墙砖相似^[18], 根据照《砌墙砖试验方法》(GB/

T 2542—2012)的相关试验方法进行抗压试验. 同一块土坯试样的两半截砖切断口相反叠放, 叠合部分不得小于 100 mm(见图 2).



(a) 试块叠放示意图



(b) 加载

图 2 抗压试验

Fig. 2 Compression test

2 破坏现象

A 试件的破坏现象如图 3 所示. 竖向力加载至 15 kN 左右, 试件周边有少许的竖向裂缝出现(见图 3(a)); 继续加载, 竖向裂缝扩大并向上、向下延伸, 在此过程中会听到生土坯内水稻秸秆被拉断时的劈啪声, 而且生土砖新增较多的细微裂缝, 个别生土坯边部

出现贯穿型裂缝(见图 3(b)); 竖向力加载至 25 kN 左右, 试件表面出现斜向裂缝, 试件表面的裂缝迅速发展, 部分地方出现掉渣现象并有表面的水稻秸秆纤维崩出(见图 3(c)); 荷载加载至 40 ~ 45 kN, 达到极限荷载, 试件表面出现较多的竖向贯通裂缝和斜裂缝, 有严重掉渣现象, 受压面面积减小, 荷载迅速下降, 试件破坏(见图 3(d)).



(a) 竖向裂缝出现



(b) 竖向裂缝发展



(c) 斜裂缝出现、发展



(d) 试件破坏

图 3 A 试件抗压破坏现象

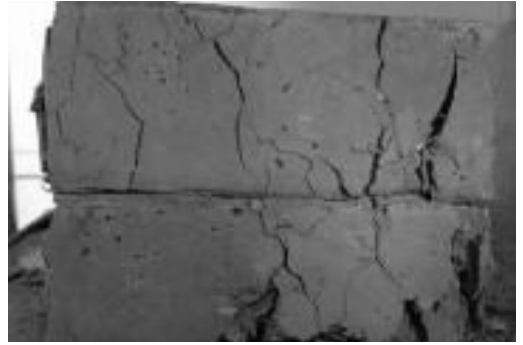
Fig. 3 Compression destructive phenomenon of A-specimens

图 4 为 S 试件抗压破坏现象. 竖向荷载加载至 25 kN 左右, 单掺炉渣的改性生土坯试件(S 试件) 出现竖向裂缝, 竖向裂缝出现的时间晚于 A 试件(见图 4(a)); 继续加载,

伴随着稻草劈啪的断裂声, 竖向裂缝伴扩大并延伸并有新裂缝产生; S 试件破坏荷载为 50 ~ 55 kN, 高于 A 试件的破坏荷载, 掉渣现象没有 A 试件严重(见图 4(b)).



(a) 竖向裂缝出现



(b) 试件破坏

图4 S试件抗压破坏现象

Fig. 4 Compression destructive phenomenon of S-specimens

图5为SA试件抗压试验现象.混掺粉煤灰、炉渣的改性生土坯(SA试件)的开裂荷载为25~30 kN,竖向裂缝的出现晚于S

试件,且裂缝更细(见图5(a));SA试件的极限荷载为55~65 kN,破坏时局部有掉渣现象(见图5(b)).



(a) 竖向裂缝出现



(b) 试件破坏

图5 SA试件抗压破坏现象

Fig. 5 Compression destructive phenomenon of SA-specimens

3 结果与分析

3.1 单掺改性材料的生土砖抗压试验结果分析

按表3的质量配合比,分别以粉煤灰和炉渣作为改性生土材料对生土进行改性,粉煤灰或炉渣A1与S1的掺量为32%、A2与S2的掺量为37%、A3与S3的掺量为41%、A4与S4的掺量为44%和A5与S5的掺量为48%,改性生土坯的单砖抗压强度 f 、平均抗压强度 \bar{f} 、标准差 S 及变异系数 δ 如表4、表5和图6.

由表4、表5和可知,粉煤灰或炉渣作为改性材料掺入生土料中,可以大幅度的体改

生土坯的抗压强度,远大于云南农村地区素土坯抗压强度^[7];随着改性材料掺量的增加,试件的抗压强度呈现持续上升趋势,单掺炉渣试件与单掺粉煤灰试件相比,抗压强度增大速率更快.粉煤灰掺量为32%、37%、41%、44%和48%,试件的平均抗压强度分别为3.05 MPa、3.29 MPa、3.40 MPa、3.52 MPa和3.93 MPa,由此说明:单掺粉煤灰达到44%后,改性生土坯平均抗压强度能满足空心砖MU3.5强度指标.炉渣掺量为32%、37%、41%、44%和48%,试件的平均抗压强度分别为3.28 MPa、3.52 MPa、3.84 MPa、4.14 MPa和4.56 MPa,由此说明:当炉渣掺量超过37%后,改性生土砖的

平均抗压强度大于 3.5 MPa, 满足自承重墙 的空心砖 MU3.5 强度指标.

表 4 单掺粉煤灰改性生土坯抗压强度

Table 4 Compressive strength of modified adobe brick with fly ash

编号	f /MPa										\bar{f} /MPa	S	δ
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#			
A1	3.17	3.21	2.92	3.06	3.13	2.88	3.01	2.81	3.26	3.08	3.05	0.147 5	0.048 3
A2	3.43	3.25	3.39	3.15	3.33	3.27	3.13	3.34	3.29	3.35	3.29	0.097 0	0.029 5
A3	3.56	3.60	3.27	3.47	3.33	3.37	3.30	3.46	3.39	3.23	3.40	0.123 4	0.036 3
A4	3.79	3.75	3.25	3.47	3.52	3.56	3.48	3.39	3.41	3.58	3.52	0.162 3	0.046 1
A5	3.81	3.79	4.09	3.93	3.92	3.93	3.88	3.91	4.05	3.99	3.93	0.094 7	0.024 1

表 5 单掺炉渣改性生土坯抗压强度

Table 5 Compressive strength of modified adobe brick with slag

编号	f /MPa										\bar{f} /MPa	S	δ
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#			
S1	3.54	2.82	3.55	3.45	3.15	3.28	3.30	3.33	3.08	3.27	3.28	0.221 3	0.067 5
S2	4.10	3.41	3.00	3.86	3.74	3.59	3.29	3.62	3.42	3.20	3.52	0.325 8	0.092 5
S3	4.02	3.79	3.84	3.91	3.97	3.57	3.49	4.06	3.95	3.84	3.84	0.184 9	0.048 1
S4	3.96	4.58	3.89	4.15	4.27	4.34	4.02	4.11	4.08	3.99	4.14	0.207 3	0.050 1
S5	4.61	4.57	4.52	4.55	4.58	4.60	4.58	4.63	4.43	4.57	4.56	0.054 8	0.012 0

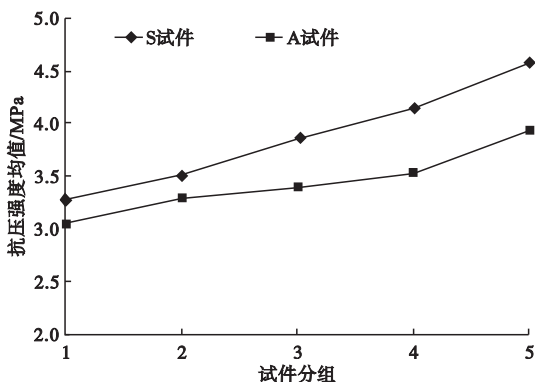


图 6 A 试件和 S 试件单砖抗压强度

Fig. 6 Compressive strength of A and B specimens

通过图 6 比较两种改性材料的改性效果, 在相同掺量的条件下, 粉煤灰的改性效果不如炉渣. 粉煤灰和炉渣在激发剂的作用下其水化反应与普通硅酸盐水泥相似^[19], 它们的水化产物主要是具有很大比表面积的水化硅酸钙凝胶、水化铝酸钙等, 这些水化物可以将黏土颗粒胶结在一起, 因此, 粉煤灰和炉渣作为改性材料添加到生土料中可大幅度提高生土坯的抗压强度^[20-21]. 然而, 粉煤灰中的

钙含量远低于炉渣, 所以产生水化物的量较少, 改性效果就差.

3.2 混掺粉煤灰和炉渣的改性生土砖抗压试验结果分析

按表 3 的质量配合比, 粉煤灰和炉渣混合掺入生土料中, 改性材料总掺量为 48%. 根据粉煤灰和炉渣的混合比例不同将 SA 试件分成 5 组, 即 SA1、SA2、SA3、SA4 和 SA5, 改性生土坯的抗压强度见表 6.

由表 6 可知, 改性材料总质量相同的情况下, 粉煤灰占混合改性材料的质量比重越大, SA 试件抗压强度越低; 单块砖抗压强度最大值为 5.47MPa、最小值为 3.95 MPa. SA1、SA2、SA3、SA4 和 SA5 试件的抗压强度均大于 3.5 MPa, 满足自承重墙的空心砖 MU3.5 强度指标; 其中 SA1 和 SA2 的平均抗压强度大于 5.0 MPa, 满足自承重墙的空心砖 MU5 强度指标.

在图 7 中比较 SA1、SA2 和 SA3 与 S5 的抗压强度可知, 粉煤灰替代部分炉渣形成

表6 混掺粉煤灰和炉渣改性生土坯抗压强度

Table 6 Compressive strength of modified adobe brick with mixed fly ash and slag

编号	抗压强度/MPa										\bar{f} /MPa	S	δ
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#			
SA1	5.47	5.12	5.02	5.27	5.15	5.28	5.24	5.38	5.32	5.23	5.25	0.123 1	0.023 5
SA2	4.87	5.30	5.08	5.00	5.06	5.22	5.04	5.27	5.05	4.95	5.08	0.132 8	0.026 1
SA3	4.78	4.74	5.06	4.84	5.12	4.96	4.93	4.97	4.70	5.15	4.92	0.149 9	0.030 4
SA4	4.42	4.45	4.22	4.60	4.74	5.04	4.83	4.92	4.95	4.80	4.70	0.251 8	0.053 6
SA5	3.95	4.38	4.48	4.71	4.14	4.07	4.22	4.65	4.42	4.60	4.36	0.244 2	0.056 0

混合改性材料,可以进一步提高炉渣改性生土砖的抗压强度.由此说明,混掺粉煤灰和炉渣对生土坯抗压强度的改性作用更好.粉煤灰不但可以改善生土料浆的和易性、促进炉渣水化反应,而且其形态效应能具有填充和润滑的作用,可以填充未参与水化反应或未完全水化反应的炉渣间隙,从而提高硬化体的抗压强度^[22]. SA1 与 SA2 的平均抗压强度相当,综合考虑实际应用中的经济学和环境效益,SA2 的效果最好,故取 m (黏土): m (粉煤灰): m (炉渣) = 0.47:0.24:0.24 作为改性生土砖建议配合比.

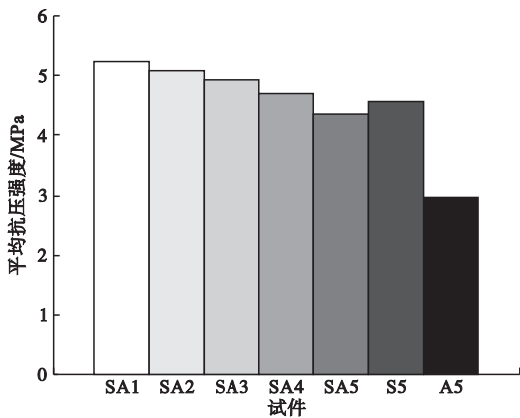


图7 单掺和混掺改性材料生土砖平均抗压强度

Fig. 7 Average compressive strength of single or mixed materials modified adobe

4 结论

(1)单掺粉煤灰、单掺炉渣和混掺粉煤灰、炉渣均可以提高生土材料的抗压强度.

(2)混掺粉煤灰、炉渣的改性效果最佳,

单掺炉渣次之,单掺粉煤灰最差.

(3)综合考虑经济效益和环境效益,建议改性生土坯的最优配合比为 m (黏土): m (粉煤灰): m (炉渣) = 0.47:0.24:0.24;按此质量配合比制作的改性生土坯抗压强度满足自承重墙的空心砖 MU5.0 强度指标.

参考文献

- [1] PIATTONI Q, QUAGLIARINI Q E, LENCI S. Experimental analysis and modeling of themechanical behaviour of earthen bricks[J]. Construction and building materials, 2011, 25: 2067-2075.
- [2] CAPORAL A, PARISISI F, ASPRONE D. Comparative micromechanical assessment of adobe and clay brick masonry assemblages based on experimental data sets[J]. Compos struct, 2015, 120: 208-209.
- [3] ADORNI E, COSSON E, FERRETTI D. In situ characterization of archaeological adobe bricks[J]. Constr. bulid mater, 2013, 40: 1-9.
- [4] SILVEIRA D, VARUM H, COSTA A. Influence of testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks[J]. Constr bulid mater, 2013, 40: 719-728.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 镇(乡)村建筑抗震技术规程: JGJ-161—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Seismic technical specification for building construction in town and village; JGJ-161—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.)
- [6] 陈志寿. 云南农村民居典型改性土坯墙片基本力学性能试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.

- (CHEN Zhishou. Basic mechanics characteristics of modified adobe block and wall of rural houses in Yunnan province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008.)
- [7] 陈嘉. 改性土体材料及土坯砌体的受压力学性能研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2009. (CHEN Jia. The mechanical characteristics of the pressure study on modified raw-soil materials and adobe masonry[D]. Urumchi: Xinjiang University, 2009.)
- [8] VEGA P, JUAN A. Mechanical characterization of traditional adobes from the north of Spain [J]. Construction and building materials, 2010, 25(7): 3020 - 3023.
- [9] KOUAKOU C H, MOREL J C. Strength and elasto-plastic properties of Non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder [J]. Applied clay science, 2009 (44): 27 - 34.
- [10] MACCABUAG J, GURAGAIN R, BHATTACHARYA S. Seismic retrofitting of non-engineered masonry in rural Nepal [J]. Structures and buildings, 2012, 165: 273 - 286.
- [11] DEGIRMENCI N. The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization [J]. Construction & building materials, 2008, 22(6): 1220 - 1226.
- [12] ANDREW C, MARCIAL B. Seismic reinforcement for adobe houses with straps from used car ties [J]. Earthquake spectra, 2012, 28(2): 511 - 530.
- [13] 马建飞. 改性生土坯及其砌体基本力学性能试验[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2013. (MA Jianfei. Experimental research on basic mechanical properties of the modified adobe and masonry[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2013.)
- [14] VILANE B R T. Assessment of stabilisation of adobes by confined compression tests [J]. Bio-systems engineering, 2010, 106(4): 551 - 558.
- [15] 李泽乐. 改性土体材料的圆柱体试块轴心抗压试验 [J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(11): 23 - 27. (LI Zele. Experimental research on the axis compressive strength of cylinder tests of modified soil materials [J]. Research and exploration in laboratory, 2013, 32(11): 23 - 27.)
- [16] 刘军, 袁大鹏. 狗尾草对加筋土坯力学性能的影响 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(4): 720 - 733. (LIU Jun, YUAN Dapeng. Impact of green bristle grass on mechanical properties of reinforced adobe [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26 (4): 720 - 733.)
- [17] 吴锋. 土坯房屋基本力学和抗震性能的试验研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2013. (WU Feng. Experimental study on mechanical properties and seismic performance of adobe building [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.)
- [18] 罗秋, 罗榛昱. 砌墙土坯的收缩和抗压性能试验研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(12): 114 - 117. (LUO Qiu, LUO Zhenyu. An experimental study on contraction and compressive property of adobes in walls [J]. Journal of southwest China normal university (natural science edition), 2015, 40(12): 114 - 117.)
- [19] 王昊. 炉渣作为水泥复合材料混合材的试验研究及机理分析 [D]. 厦门:厦门大学, 2014. (WANG Hao. The experimental study and mechanism analysis of coal cinder used as cement admixture [D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.)
- [20] 余海燕, 程海平, 石俊尧, 等. 改性生土材料对生土物理力学性能的影响及作用机理 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(5): 1443 - 1449. (YU Haiyan, CHENG Haiping, SHI Junyao, et al. Effect of modified agent on the physical and mechanical properties of raw-soil and its action mechanism [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2016, 35(5): 1443 - 1449.)
- [21] 郑寒英, 刘家拥, 朱柯, 等. 不同改性材料对生土墙体材料性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2014, 5: 62 - 66. (ZHENG Hanying, LIU Jiayong, ZHU Ke, et al. The different effects of modified materials on the performance of raw soil wall materials [J]. China concrete and cement products, 2014, 5: 62 - 66.)
- [22] 张超. 粉煤灰和炉渣作为水泥混合材及粉煤灰掺量对不同水胶比混凝土的强度影响研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2012. (ZHANG Chao. Study on fly ash and cinder used as cement admixture and the influence of fly ash dosage on the strength of concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.)