

文章编号:1671-6833(2018)05-0085-06

不同掺合料对土坯墙泥浆抗压强度影响研究

童丽萍, 李 聪

(郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:开展泥浆立方体抗压强度试验,以研究不同含量粗砂、石灰对泥浆立方体抗压强度的影响及其之间的相关关系,寻找不同掺合料的最优配合比,为土坯墙的建造改良和加固提供理论数据.试验结果表明:随着粗砂含量的增加,试块抗压强度呈现先增大后减小的趋势;掺和石灰对试块抗压强度略有提高,随石灰含量的增加,试块抗压强度变化不明显.泥浆抗压强度与掺合料之间呈良好的 3 次多项式关系.

关键词:土坯墙;泥浆;掺合料;立方体试块;抗压强度

中图分类号:TU521.3 文献标志码:A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.009

0 引言

随着自然资源的大量消耗,生态环境日益恶化,气候变暖、能源危机等引起人们重视,可持续发展的建筑理念深入人心<sup>[1]</sup>.土坯建筑是一种良好的绿色建筑形式,其材料无需烧结,取之自然,碳排放少,节能环保,具有良好的生态性能,它既是传统文化的传承与保护,又能适应旅游业等新兴产业<sup>[2-4]</sup>.在人们日益为生态环境担忧,倡导可持续发展的今天,它以独特的生态性能引起了学术界的广泛关注<sup>[5]</sup>.

泥浆是砌筑土坯墙体的主要材料,对提高土坯墙体整体受力性能具有重要作用<sup>[6]</sup>.近年来,专家学者对泥浆的材料特性进行了大量的研究并取得一定的研究成果.根据研究成果,骨料种类及含量、含水率、石灰、纤维等添加料对泥浆立方体试块的抗压强度具有显著影响<sup>[7-10]</sup>.然而由于生土材料地域不同,其矿物含量离散性较大,现阶段对掺合料耦合作用影响及敏感性研究较少,泥浆强度对土坯砌体及墙体受力性能研究较为匮乏,不同掺合料对土坯墙泥浆抗压强度的机理影响不明确<sup>[11-13]</sup>,因此研究不同掺合料对泥浆抗压强度的影响,进而研究不同掺合料泥浆对土坯砌体及墙体的影响是很有必要的.

笔者通过土坯墙泥浆抗压强度试验,以稻草

含量为定量,以粗砂、石灰为变量,分析试验的破坏过程及结果,研究不同掺合料对泥浆抗压强度的影响,给出泥浆的合理配合比,为进一步研究不同掺合料泥浆对土坯墙受力性能提供参考.

1 试验概况

1.1 试验材料

试验制备了 25 种土样,分别在天然土中添加定量的稻草和不同含量的粗砂和石灰.土料和稻草取自河南省郑州市,稻草长度为 2~3 mm,粗砂采用水洗砂,试验前土料用孔径 5 mm 的筛网过筛,水洗砂用孔径 0.5 mm 和 2 mm 的土工筛过筛.

1.2 试件制作

参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009),结合目前生土材料的研究,选边长为 100 mm 的立方体试块抗压强度作为生土材料的标准尺寸,每组制作 5 个.天然土样与稻草(掺合量为 0.5%<sup>[14]</sup>)、粗砂、石灰配合比(与土质量比)如表 1 所示.

采用精确度为 0.5 g 的电子秤称量土样、稻草、粗砂以及石灰,用三角铲拌合均匀后,加入水搅拌均匀,控制含水率在 35% 左右<sup>[15]</sup>.塑料试模内涂刷薄层机油,将拌制好的泥浆一次性装满 100 mm 混凝土试模,用人工振捣方法,捣棒均匀

地由边缘向中心按螺旋方式插捣 25 次,使泥浆高出试模顶面 6~8 mm,待表面水分稍干后,用土工刀将高出试模部分的泥浆沿顶面刮去并抹平<sup>[16]</sup>.制作完成后静置 48 h,然后对试块进行拆模、编号、称重.试块拆模后应在实验室常温下养护 28 d,养护完后称重,并用游标卡尺测量各试件的长宽高.

表 1 土样配比及试件个数

Tab. 1 Proportion of soil sample and number of specimens				
试件组号	泥浆掺合料的参量/%			
	稻草	粗砂	石灰	
A	0.5	—	—	
B	0.5	30、40、50、60	—	
C	0.5	—	2、4、6、8	
D	D1	0.5	30	2、4、6、8
	D2	0.5	40	2、4、6、8
	D3	0.5	50	2、4、6、8
	D4	0.5	60	2、4、6、8

1.3 试验步骤

泥浆立方体试块抗压强度试验,采用 300 kN 电液伺服万能试验机,可自动记录试件的荷载和位移,试验时选择量程为 0~20 kN.进行抗压强度试验时,首先将试件放置在试验机的下压板上,使加载面中心与试件中心对正,若试件表面不平整,采用细砂找平.在正式加载前预压一次,预压荷载 0.5~1.5 kN,以保证试件与加载面紧密接触.试件放置完成后,采用荷载控制的加载方法进行连续加载,加载速率 0.03~0.05 kN/s,控制试件 6~10 min 破坏,记录破坏现象及破坏荷载.

2 试验结果与分析

2.1 稻草因素影响

图 1 为稻草试块抗压强度试验破坏过程,在试件加载初期,荷载与位移成线性比例关系,此阶段为弹性阶段.当加载至破坏荷载的 45%~55% 时,有轻微的脆裂声,此时试件内部的稻草部分被拉裂.随着荷载的增加,脆裂声密集,试件表面出现细微裂缝,如图 1(a).裂缝一般首先出现在试块的边角部位,此时试块上部开始掉渣,接着边缘土体有崩落现象,有稻草裸露至外部,如图 1(b).接近破坏荷载时,表面裂缝多而细并上下贯通;达到破坏荷载后,试件没有立刻破坏,此时仍然具有一定的承载能力,稻草的作用得以发挥;当荷载急剧下降至破坏荷载的 75% 左右时,下降速度变

慢,试件大部分被压崩,试件破坏[如图 1(c)],试验结束.

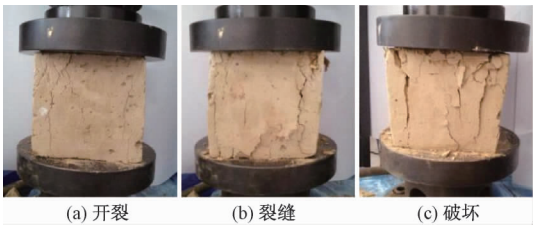


图 1 掺合稻草试块抗压强度试验破坏过程

Fig.1 Failure process of rice straw-mixed specimens for compressive strength tests

掺合稻草泥浆立方体试块抗压强度试验结果如表 2,其荷载位移曲线及拟合曲线如图 2 所示.从表 2 中可以看出,添加稻草的泥浆立方体试块抗压强度为 0.91~1.23 MPa,平均值为 1.08 MPa.图 2 表明,试块经历了弹性阶段、开裂阶段、破坏阶段,其破坏过程和混凝土类似.在试件加载初期,荷载位移曲线呈直线,斜率较小,有一个压密阶段,此阶段持续时间较短.拟合曲线中 AB 段趋近于直线,试件土体处于弹性变形阶段;BC 段成凸形,试件土体开始屈服,产生微裂缝、鼓胀,并进一步发展;曲线 C 点为峰值(位移为 3 mm 左右),试件达到破坏荷载;曲线 CD 段呈下降趋势,裂缝发展迅速,试件破坏.

表 2 A 组试块抗压强度试验结果平均值

Tab.2 Average compressive strength of the cube specimens group A						
编号	破坏荷载/ kN	破坏位移/ mm	抗压强度			
			数值/ MPa	平均值/ MPa	标准差	变异系数
A1	11.63	3.52	1.23			
A2	8.91	1.54	0.91			
A3	11.01	2.24	1.12	1.08	0.104	0.097
A4	10.85	2.83	1.11			
A5	10.15	2.64	1.04			

2.2 粗砂含量影响

图 3 为稻草粗砂试块抗压强度试验破坏过程,由于试块中同样掺加了重量比 0.5% 的稻草,B 组试块与 A 组破坏现象类似.当加载至破坏荷载的 55%~70% 时,表面出现开裂裂缝,开裂荷载与 A 组试块相比较,裂缝除出现在试块边角部位及偏向边缘处外,还明显出现在试块中部,如图 3(a)、(b)所示.随着荷载的增加,试块上部边缘处有少量土块掉落,裂缝逐渐增多并缓慢发展至贯通,此时稻草被拉结,断裂声密集;达到破坏

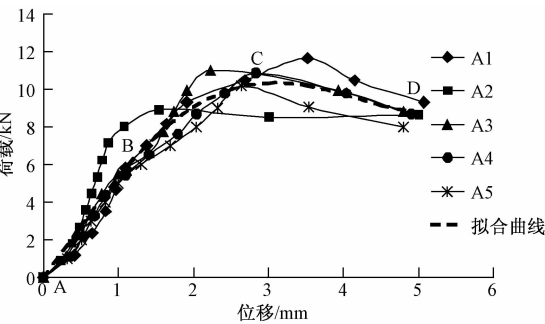


图 2 A 组立方体试块荷载-位移曲线及拟合曲线

Fig.2 Load-displacement curves and fitting curves of the cube specimens in group A



图 3 掺合稻草粗砂试块抗压强度试验破坏过程

Fig.3 Failure process specimens with rice straw and rough sand during compressive strength tests

荷载后,试块裂缝急剧增宽,但没有立即溃散,仍然有一定的承载力;继续加载,试块四周崩裂,呈现延性破坏,如图 3(c)所示。

以 B2 组掺合 40% 的粗砂为例具体分析试验结果,如表 3 和图 4 所示。分析可知,曲线 AB 段斜率较小,试件土体处于压密阶段,内部空隙变小;曲线 BC 段趋近于直线,试件土体处于弹性变形阶段;加载至破坏荷载的 65% 左右,荷载随位移增长速度变缓,CD 段呈凸形,试件土体开始屈服,产生微裂缝、鼓胀,并进一步发展;曲线 D 点为峰值(位移为 3 mm 左右),试件达到破坏荷载;曲线 DE 段呈下降趋势,裂缝发展迅速,试件破坏。

表 3 B2 组试块抗压强度试验结果平均值

Tab.3 Average compressive strength of the specimens in group B2

编号	破坏荷载/ kN	破坏位移/ mm	抗压强度			
			数值/ MPa	平均值/ MPa	标准差	变异系数
B2-1	13.95	3.38	1.44			
B2-2	13.12	2.34	1.33			
B2-3	13.91	2.92	1.44	1.45	0.134	0.093
B2-4	16.14	1.92	1.64			
B2-5	13.34	2.69	1.39			

不同粗砂含量的试块抗压强度试验结果如表 4,不同粗砂含量立方体荷载位移拟合曲线如

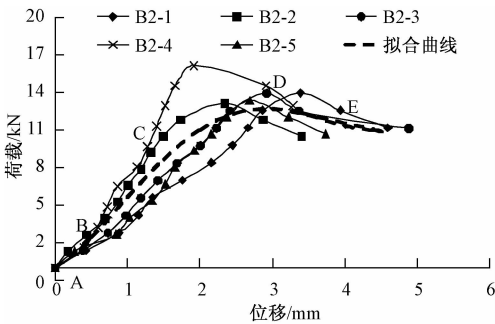


图 4 B2 组立方体试块荷载-位移曲线及拟合曲线

Fig.4 Load-displacement curves and its fitting curves of the cube specimens in group B2

图 5。由表 4 可知,不同粗砂含量的试块抗压强度为 1.21 ~ 1.45 MPa,相对 A 组提高了 12.0% ~ 34.3%。由图 5 可知,当粗砂含量为 30% ~ 40% 时,随着含砂量的增高,立方体试块抗压强度增大,说明粗砂在土体中起到一定的骨架作用,增加了土体之间的咬合力,从而增大土体抗压能力。当掺加粗砂比例为 40% 时,试块破坏荷载达到最大,此时试块具有一定的压密阶段,变形能力增加显著。当粗砂含量为 40% ~ 60% 时,试块破坏荷载逐渐降低,有两个原因:一是粗砂所占体积较大,加之有稻草的存在,两种掺合料没有与土体形成良好的黏结,内部存在空隙,导致试块强度降低;二是粗砂含量较大,加载过程中,粗砂与土体之间产生的微裂缝增多,使试块强度降低。

表 4 B 组试块抗压强度试验结果平均值

Tab.4 Average compressive strength of the specimens in group B

编号	破坏荷载/ kN	破坏位移/ mm	平均值/ MPa	标准差	变异系数
B1	13.03	2.63	1.33	0.089	0.067
B2	14.09	2.65	1.45	0.134	0.093
B3	12.98	2.39	1.32	0.080	0.061
B4	11.817	3.388	1.21	0.082	0.068

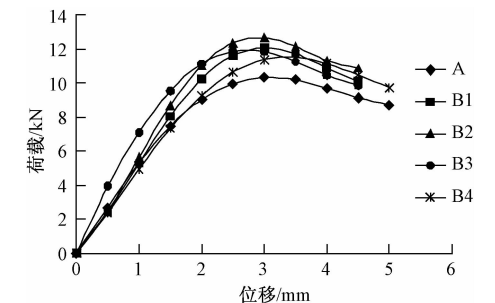


图 5 不同粗砂含量立方体试块荷载-位移拟合曲线

Fig.5 Load-displacement curves of the cubic specimens with different coarse sand content

对掺合粗砂试块抗压强度与粗砂含量进行回归分析,发现试块抗压强度与粗砂含量  $x(0 \leq x \leq 60\%)$  呈现良好的 3 次多项式关系,如式(1)所示:

$$y = -0.000\ 01x^3 + 0.000\ 6x^2 - 0.001\ 1x + 1.078\ 9,$$
$$R^2 = 0.965\ 5.$$

(1)

2.3 石灰含量影响

图 6 为掺合稻草石灰试块抗压强度试验破坏过程. 试块在加载初期,同样经历弹性阶段,当加载至破坏荷载的 40% ~ 55% 时,试件发出轻微的脆裂声,此时内部稻草轻微拉裂,由于石灰凝结硬化,试块表面土体脆性较大,表面崩裂如图 6(a)所示. 随着荷载增加,内部形成贯通裂缝并急剧增加,当达到破坏荷载后,土体崩落加剧,试件迅速破坏. 由于稻草的拉结作用,试块整体呈延性破坏,但表面土体破坏现象与 A 组、B 组有所不同,呈层状崩落,如图 6(b)所示.

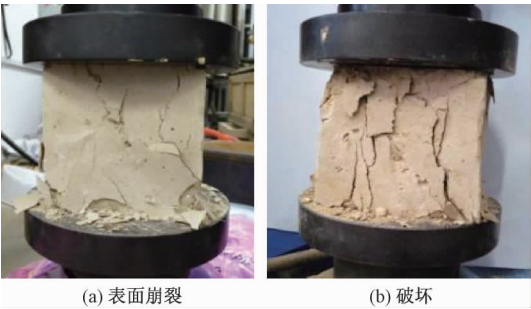


图 6 掺合稻草石灰试块抗压强度试验破坏过程  
Fig.6 Failure process of the specimens with rice straw and lime during the compressive test

掺合不同石灰的试块试验结果如表 5 和图 7 所示. 从图 7 可知,掺合石灰的泥浆立方体试块,经历弹性、屈服、破坏 3 个阶段,与添加粗砂的试块相比,无明显压密阶段,说明石灰的硬化作用增加了试块的脆性,导致试块延性减小.

表 5 C 组试块抗压强度试验结果平均值  
Tab.5 Average compressive strength of the specimens in group C

编号	破坏荷载/ kN	破坏位移/ mm	抗压强度		
			平均值/ MPa	标准差	变异系数
C1	11.18	2.16	1.17	0.100	0.085
C2	11.56	3.57	1.19	0.038	0.032
C3	11.73	2.34	1.20	0.064	0.054
C4	11.41	2.69	1.18	0.130	0.110

分析表 5 可知,随着石灰含量的增大,试件抗

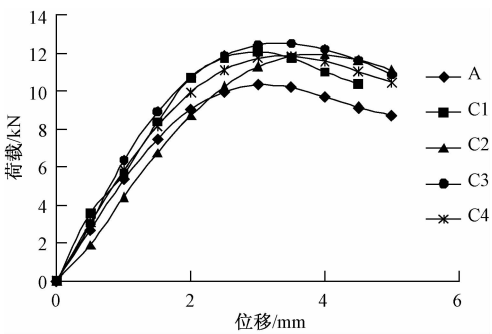


图 7 不同石灰含量立方体试块荷载-位移曲线  
Fig.7 Load-displacement curves of the cube specimens with different lime contents

压强度呈现先增大后减小的趋势. 石灰含量为 2% ~ 6% 时,试块抗压强度增加约 8.0% ~ 11.2%,说明石灰在试块养护过程中,吸收了部分水分,加快试块固结硬化,增加试块强度;石灰含量为 6% ~ 8% 时,试块抗压强度反而略微减少,是由于石灰含量增大,养护过程中吸收的水分增加,减少了试块的固结水分,固结速度过快,土体内的胶结材料不能充分发育. 从整体看,石灰含量的变化对试块抗压强度影响较小.

对掺合石灰试块抗压强度与石灰含量进行回归分析,发现试块抗压强度与石灰含量  $x(0 \leq x \leq 8\%)$  呈现良好的 3 次多项式关系,

$$y = 0.000\ 3x^3 - 0.007\ 7x^2 + 0.056x + 1.080\ 4,$$
$$R^2 = 0.997\ 1.$$

(2)

2.4 粗砂石灰含量影响

图 8 为稻草粗砂石灰试块抗压强度试验破坏过程,D 组试块和 B 组试块破坏现象类似,加载初期为弹性阶段,无明显现象,随着荷载增加,同样是边缘土体或中部首先出现细微裂缝,内部稻草拉结发出轻微脆裂声,但由于粗砂起骨架作用的同时石灰具有凝结硬化作用,造成试块破坏过程

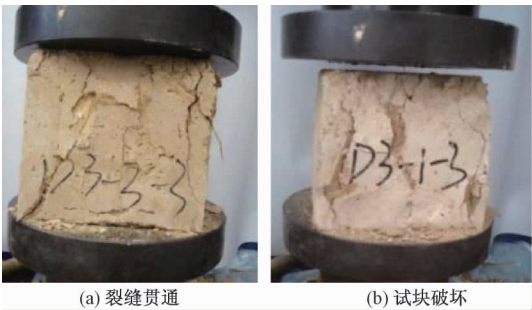


图 8 掺合稻草粗砂石灰试块抗压强度试验破坏过程  
Fig.8 Failure process of the specimens with rice straw, sand and lime during the compressive strength tests



中延性明显减小,经历弹性阶段后,试块两侧裂缝贯通速度加快,如图8(a),快速达到破坏荷载,之后土块崩落,试块破坏,如图8(b)。

掺合不同含量粗砂和石灰的试块抗压强度试验结果如表6所示,不同粗砂含量、石灰含量与试块抗压强度关系如图9。

表6 D组试块抗压强度试验结果平均值

Tab.6 Average compressive strength of the specimens group D

编号	破坏荷载/ kN	破坏位移/ mm	抗压强度		
			平均值/ MPa	标准差	变异系数
D1-1	11.56	2.05	1.19	0.230	0.193
D1-2	10.72	2.22	1.11	0.199	0.180
D1-3	13.19	2.54	1.36	0.132	0.097
D1-4	12.39	2.34	1.27	0.231	0.182
D2-1	12.07	2.20	1.25	0.110	0.088
D2-2	13.66	2.20	1.40	0.121	0.086
D2-3	14.87	2.17	1.53	0.122	0.080
D2-4	13.15	2.89	1.35	0.057	0.042
D3-1	11.46	2.25	1.17	0.176	0.150
D3-2	14.04	3.17	1.45	0.083	0.057
D3-3	13.15	2.30	1.34	0.094	0.070
D3-4	12.69	1.81	1.31	0.248	0.190
D4-1	10.91	3.40	1.11	0.180	0.162
D4-2	12.32	2.21	1.27	0.209	0.164
D4-3	12.51	2.08	1.30	0.090	0.069
D4-4	12.13	2.81	1.23	0.173	0.140

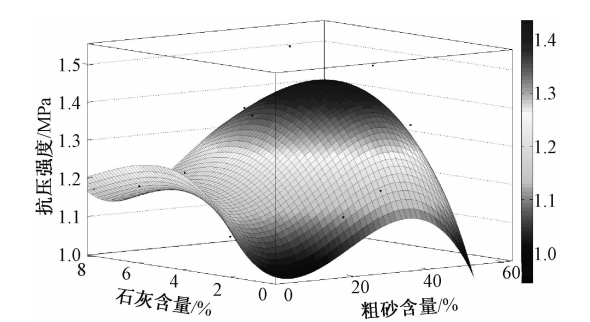


图9 不同石灰、粗砂含量与试块抗压强度关系图

Fig.9 Relationship between the coarse sand content of different lime and compressive strength of test block

同时掺合粗砂和石灰时,材料之间相互作用机理较为复杂,从表6可以看出,掺合不同含量粗砂石灰的试块,抗压强度为1.11~1.53 MPa。当粗砂含量为40%、石灰含量6%时,试块抗压强度最大,为1.53 MPa。由图9可知,在相同石灰含量下,试块抗压强度随粗砂含量增加基本呈先减少再增加再减少的趋势。以石灰含量6%为例说明其原因:粗砂具有一定的棱角和硬度,当粗砂含量

较小时,骨架作用没有充分发挥,降低了试块抗压强度;随粗砂含量增加,粗砂与掺合石灰的土体之间咬合作用得以发挥,试块抗压强度增大;当粗砂含量为40%~60%时,粗砂体积比较大,由于粗砂与土体之间形成的微裂缝增多,粗砂骨架作用提高的强度小于裂缝降低的强度,随着粗砂含量增加,试块抗压强度降低。

为综合分析石灰和粗砂两变量的相关性,对试验数据进行回归分析,试块抗压强度 $z$ 与粗砂含量 $x(0\leq x\leq 60\%)$ 、石灰含量 $y(0\leq y\leq 8\%)$ 呈3次多项式关系,

$$z = -8.865e^{-6}x^3 + 1.183e^{-3}y^3 - 1.507e^{-5}x^2y - 2.205e^{-4}xy^2 + 7.936e^{-3}x^2 - 2.694e^{-2}y^2 + 3.377e^{-3}xy - 0.0219x + 0.0179y + 0.8616,$$
$$R^2 = 0.8109.$$

### 3 结论

笔者通过系列试验研究了不同含量掺合料下土坯墙泥浆立方体试块抗压强度,得出以下主要结论。

(1)添加稻草的试块,抗压强度平均值为1.08 MPa,破坏位移较大,达到破坏荷载后没有立即崩裂溃散,仍具有一定承载力,破坏形式为延性破坏。

(2)随着粗砂含量的增加,试块抗压强度呈现先增大后减小的趋势。掺合粗砂含量在40%左右时,对试块破坏荷载影响较大,一定程度上提高试块变形能力。试块抗压强度与粗砂含量呈现良好的3次多项式关系,受粗砂含量影响显著。

(3)掺合石灰对试块抗压强度略有提高,石灰含量为6%时,抗压强度值最大。试块抗压强度与石灰含量呈现良好的3次多项式关系。

(4)掺合粗砂石灰的试块,粗砂含量40%、石灰含量6%时,试块抗压强度提高较大,变形能力无明显变化。不同粗砂石灰含量下,试块抗压强度与粗砂含量(0~40%)、石灰含量(0~6%)呈3次多项式关系。

### 参考文献:

[1] 王毅红,梁健,张项英,等.我国生土结构研究综述[J].土木工程学报,2015,48(5):98-107.

[2] 李蜜.传统村落民居生土建筑营造工艺及其优化应用研究[D].重庆:重庆大学材料科学与工程学院,2016.

[3] 王沛钦,郑山锁,柴俊,等.走向生土建筑结构[J].工业建筑,2008,(3):101-105.

[4] ALLINSON D, HALL M. Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK[J]. Energy and buildings, 2010, 42(6): 845 – 852.

[5] 吴锋. 土坯房屋基本力学和抗震性能的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2013.

[6] TAUCER F, JOHN E. ALARCON, et al. 2007 August 15 magnitude 7.9 near the coast of Central Peru: analysis and filed mission report[J]. Bull earthquake Eng, 2009, 7(1): 1 – 70.

[7] 丛欣峰,阿肯江·托呼提,黄斌,等. 土坯砌体轴心受压力学性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(1): 95 – 99 + 90.

[8] 张延年,马建飞. 改性生土坯抗压性能试验研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(4): 57 – 63.

[9] IIIAMPAS R, CHARMPIS D C, IOANNOU I. Laboratory testing and finite element simulation of the structural response of an adobe masonry building under horizontal loading [J]. Engineering structures, 2014 (80): 362 – 376.

[10] WU F, LI G, Li H N, et al. Strength and stress-strain characteristics of traditional adobe block and masonry [J]. Materials and structures, 2013, 46(9): 1449 – 1457.

[11] 赵成. 改性土坯砌体抗压强度试验研究[D]. 新疆: 新疆大学建筑工程学院, 2010.

[12] VEGA P, JUAN A, GUERRA M I, et al. Mechanical characterization of traditional adobes from the north of Spain[J]. Construction and building materials, 2011, 25(7): 3020 – 3023.

[13] PIATTONI Q, QUAGLIARINI E, LENCI S. Experimental analysis and modeling of the mechanical behaviour of earthen bricks[J]. Construction and building materials, 2011, 25(4): 2067 – 2075.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 161—2008 镇(乡)村建筑抗震技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[15] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.

[16] 中华人民共和国建设部. JGJ/T 70—2009 建筑砂浆基本性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

Study on the Influence of Different Admixtures on Compressive Strength of Adobe Wall Mud

TONG Liping, LI Cong

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to study the influence of coarse sand and lime with different contents on the compressive strength of the mud cube and the correlation between them, the compressive strength test of the mud cube were carried out, and the optimal mixing ratio of different admixtures was found to provide theoretical data for the improvement and reinforcement of the adobe wall. The experimental results showed that the compressive strength of the specimen increased first and then decreases with the increase of coarse sand content. The compressive strength of the test block was slightly improved by adding lime. with the increase of lime content, the compressive strength of the test block had no obvious change. There was a good polynomial relationship between the compressive strength of the slurry and the admixture.

**Key words:** adobe wall; mud; additive; cube test pieces; compressive strength