

文章编号:1674-2974(2016)03-0127-08

现浇磷石膏抗压强度的试验研究*

张华刚^{1†}, 吴琴¹, 贾晓飞¹, 陈红鸟¹, 马克俭¹, 赵敏², 谢光亚³

(1. 贵州大学空间结构研究中心, 贵州 贵阳 550003; 2. 贵州大学勘察设计研究院, 贵州 贵阳 550025;
3. 贵州建工集团第一建筑工程有限公司, 贵州 贵阳 550003)

摘要:在改性研究及工程实践基础上,对磷石膏掺入磷渣微粉、熟石灰、水泥、减水剂和缓凝剂确定了9种材料配合比,按水灰比为0.43制作了52个立方体试件和33个棱柱体试件进行抗压强度试验,还按第7种配合比制作8个比例为1/2的墙体模型进行轴心受压试验,结合前期研究结果确定现浇磷石膏的抗压强度值。结果表明,棱柱体抗压强度约为立方体抗压强度的0.8倍,墙体中的现浇磷石膏抗压强度约为棱柱体抗压强度的0.68倍,材料容重可取14.0~15.0 kN/m³。以工程实例为基础进行了可靠度分析,建议现浇磷石膏的材料分项系数取1.9,并给出了按本文材料配合比的抗压强度标准值及设计值。

关键词:现浇磷石膏;抗压强度试验;墙体;可靠指标;材料分项系数

中图分类号:TU502.6;TU317.3

文献标识码:A

Experimental Investigation on Compressive Strength of Cast-in-situ Phosphogypsum

ZHANG Hua-gang^{1†}, WU Qin¹, JIA Xiao-fei¹, CHEN Hong-niao¹,
MA Ke-jian¹, ZAO Ming², XIE Guang-ya³

(1. Space Structures Research Center, Guizhou Univ, Guiyang, Guizhou 550003, China;
2. Engineering Investigation & Design Institute, Guizhou Univ, Guiyang, Guizhou 550025, China;
3. First Constructional Engineering Co, Ltd, Guizhou Constructional Engineering Group, Guiyang, Guizhou 550003, China)

Abstract: On the basis of previous researches and engineering practice, total 52 cubic and 33 prismatic phosphogypsum specimens were made by a water/cement ratio of 0.43, where nine mix proportions for phosphogypsum were involved according to the different mixture of phosphorous slag micro-powder, hydrated lime, cement, water reducer and retarder. Furthermore, total 8 one-second scale wall models using the 7th mix proportion were also made for axial compression tests. Experimental results combined with the earlier research show that the compressive strength of cast-in-situ phosphogypsum wall is about 0.68 times the prism compressive strength, while the latter is about 0.8 times cube compressive strength. Additionally, the recommended value of material weight is around 14.0 kN/m³ to 15.0 kN/m³. Based on the reliability analysis of engineering examples, the material partial coefficient of cast-in-situ phosphogypsum is recommended as 1.9, and the standard value and design value of phosphogypsum compressive strength are given according to the mix proportion examined in this paper.

* 收稿日期:2015-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51168008), National Natural Science Foundation of China(51168008)

作者简介:张华刚(1970-),男,贵州遵义人,贵州大学教授

† 通讯联系人, E-mail: zhg0618@163.com

Key words: cast-in-situ phosphogypsum; compressive test; wall; reliability index; material partial coefficient

磷化工企业排放的磷石膏堆积后,其中的可溶性 P_2O_5 和氟化物等有害物质会渗透进土壤和水系而引起环境污染,因此对其治理已成为磷化工企业发展伴生的环保问题^[1]. 当前在建筑工程中主要用磷石膏生产水泥、装修材料及非承重隔墙的砌块等,磷石膏利用率较低^[2],因此,有必要寻求磷石膏资源化利用的新途径.

磷石膏原料主要含二水石膏,在常压下焙烧脱水后成为 β 型半水石膏,水化后又还原为二水石膏^[3]. 为了利用磷石膏浆体硬化后的强度,马克俭等^[4-5]提出将磷石膏现浇成墙用于建筑结构,但浇筑后的初凝时间仅为 3~5 min,现浇浆体的流动性较差,游离水分蒸发缓慢,会导致墙体耐水性差,表面抹灰有空鼓、脱落等现象. 曹建新等^[6]通过掺入磷渣微粉、熟石灰、水泥、减水剂和缓凝剂等开展了现浇磷石膏的改性研究,缩短了初凝时间、延长了终凝时间、提出了材料的工程配合比. 在不考虑现浇磷石膏强度和刚度贡献条件下,张华刚等^[7]在贵州瓮福磷业集团进行了一栋 12 层住宅示范建筑的工程实践,其结构情况如图 1 所示,按 6 度设防,楼板采用磷石膏预制模盒的箱型密肋板,外墙及分户墙为混凝土网格框架-现浇磷石膏组合墙(磷石膏后浇),房间分隔墙采用非承重磷石膏砌块砌筑,箱型密肋板和组合墙的总厚度均为 300 mm. 工程决算表明,钢筋用量为 43.8 kg/m^2 ,混凝土用量为 $238 \text{ mm}^3/\text{m}^2$,

磷石膏用量为 $213 \text{ mm}^3/\text{m}^2$,混凝土和磷石膏的用量基本持平,可见将磷石膏现浇用于建筑结构是对其综合利用的一条有效途径. 卢亚琴等^[8]对组合墙进行了试验研究,表明组合墙具有良好的力学性能.

通过工程实践总结的磷石膏现浇工艺为:1)混凝土网格框架验收;2)墙体模板制安并封堵;3)根据材料质量配合比拌合现浇磷石膏物料;4)将物料流入料斗并泵送至模板内,物料自流平并在 30 min 内基本凝结,12 h 后即可拆模.

伴随工程实践,卢亚琴等^[9]测定了现浇磷石膏的放射性、含水率及凝结时间等基本性能. 罗玗等^[10]开展了现浇磷石膏抗压强度影响因素的试验研究,梁凡凡等^[11]初步测定了其弹性模量和泊松比,上述两个试验均在普通电液伺服压力试验机上进行. 由于现浇磷石膏的脆性较强,吴琴等^[12]通过自制加载装置开展了现浇磷石膏应力-应变曲线的试验研究,给出了现浇磷石膏的本构关系、测定了其弹性模量和泊松比.

材料强度是其工程应用时的重要力学参数,本文共考虑现浇磷石膏的 9 种材料配合比进行抗压强度试验和墙体轴心受压试验,并以两层现浇磷石膏农村住宅为基础进行墙体的可靠度分析,以期确定现浇磷石膏的抗压强度设计指标并提出其材料分项系数,供工程应用参考.

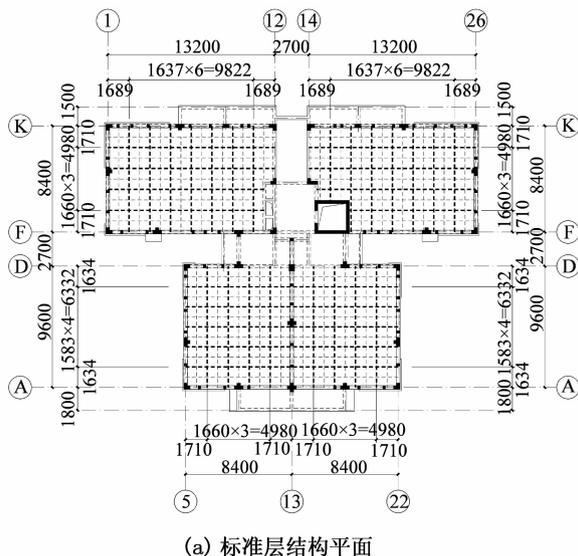


图 1 瓮福集团示范建筑

Fig. 1 Demonstration building of Wengfu Group Company

1 试验概况

1.1 试验材料

磷石膏和磷渣微粉均取自贵州瓮福磷业集团,磷石膏的石膏相组成测定如表 1 所示;磷渣微粉的比表面积为 380~420 m²/kg,化学成分见表 2;熟石灰市购,有效 CaO 的质量分数不低于 60%;水泥为 P. O325 普通硅酸盐水泥;减水剂为聚羧酸减水剂,浓度不低于 10%;缓凝剂为柠檬酸钠。

采用 JMS-6490LV 型扫描电子显微镜分别对磷石膏和磷渣微粉作形貌分析,结果如图 2 所示^[6],其中图 2(a)照片的标尺为 100 μm,图 2(b)照片的标尺为 60 μm。磷石膏中的半水石膏晶体大体呈平行四边形板状。磷渣微粉颗粒呈“碎石”状,有清晰的棱角而没有固定的解理面。采用 X 射线衍射仪分析的结果如图 3 所示^[6],磷渣微粉主要由玻璃组成,含少量假硅灰石、枪晶石及磷灰石,是一种具有潜在活性的火山质材料,可充填在现浇后半水石膏晶体间的空隙内。

表 1 磷石膏的石膏相组成(质量分数)

Tab.1 Gypsum compositions of phosphogypsum %

二水石膏	β-半水石膏	无水石膏	
		可溶性	难溶性
0.78	87.61	2.45	2.12

表 2 磷渣微粉的化学成分(质量分数)

Tab.2 Chemical compositions of phosphorite slag %

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	CaF ₂
42.35	1.67	3.52	45.36	1.73	1.46	1.07

0.43~0.46。现场配置材料时不可避免会存在偏差,因此本文采用磷石膏、磷渣微粉和熟石灰的质量配合比总和为 100%,水泥用量按上述混合物的质量计算,拌合均匀后得到混合干物料,减水剂和缓凝剂的用量按混合干物料的质量计算,考虑材料配合比的可能变化范围并进行交叉分析,得到如表 3 所示的 9 种质量配合比,水灰比均为 0.43。根据前期研究情况^[10],本文第 7 种配合比的缓凝剂掺入量分别为 0.2%,0.3%和 0.4%。

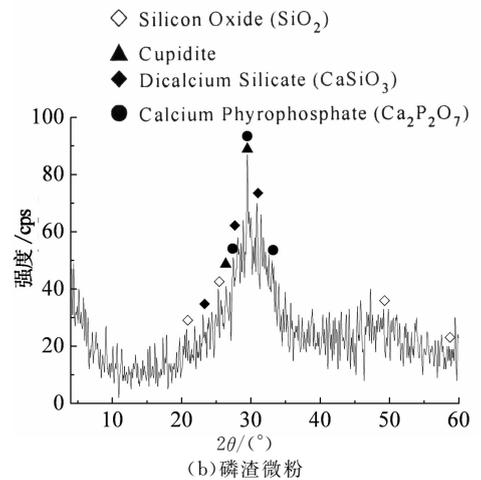
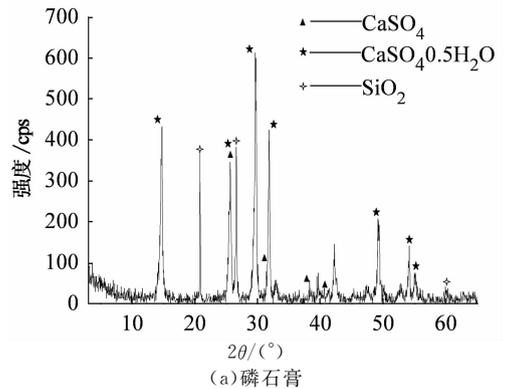


图 3 原材料的 XRD 图谱

Fig.3 XRD spectrum of material

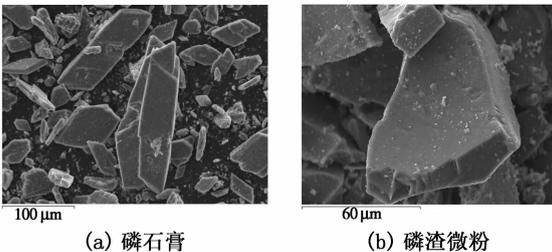


图 2 原材料的 SME 照片

Fig.2 SEM photograph of material

1.2 材料配合比

贵州瓮福磷业集团示范建筑采用的材料质量配合比为:磷石膏 80%,磷渣微粉 17%,熟石灰 3%,水泥 2%,减水剂 0.8%,缓凝剂 0.3%,水灰比为

1.3 试件设计

按表 3 的配合比共制作了 52 个立方体试件和 33 个棱柱体试件,立方体试件的理论边长为 100 mm,棱柱体试件的理论尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm。

工程应用时,总希望采用较多的磷石膏,前期研究表明^[10-11],现浇磷石膏的强度随缓凝剂用量的增大而呈下降趋势,因此墙体轴心受压试验采用了第 7 种配合比,以缓凝剂掺入量为 0.3%按 1/2 缩小比例制作试件,墙体试件的实测尺寸见表 4,试件示意图如图 4 所示。

表3 试件材料的质量配合比
Tab.3 Mass proportion for materials of specimens

配合比 编号	材料质量组分/%					
	磷石膏	磷渣粉	熟石灰	水泥	减水剂	缓凝剂
1	75	20	5	5	0.6	1.0
2	75	20	5	2	0.8	0.3
3	75	20	5	10	1.0	1.5
4	80	17	3	5	0.8	1.5
5	80	17	3	2	1.0	1.0
6	80	17	3	10	0.6	0.3
7	85	9	6	5	1.0	0.2~0.4
8	85	9	6	2	0.6	1.5
9	85	9	6	10	0.8	1.0

表4 轴心受压墙体试件的基本参数
Tab.4 Parameters of wall for axially compression

试件编号	几何尺寸平均值/mm			高厚比 β
	a	b	h	
Q-1a	200	118	458	3.88
Q-1b	199	118	458	3.88
Q-2a	200	119	754	6.34
Q-2b	201	120	754	6.28
Q-3a	200	122	1053	8.63
Q-3b	198	121	1054	8.71
Q-4a	201	119	1354	11.38
Q-4b	199	119	1354	11.38

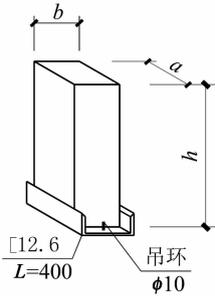


图4 墙体轴心受压试件
Fig.4 Axially compression specimens of wall

1.4 加载装置及制度

1.4.1 抗压强度试验

普通压力试验机的刚度较大而容易冲坏试件,因此抗压强度试验采用50 t油压千斤顶施加轴心压力,加载装置如图5所示。由于试件几何对中的误差及磷石膏的脆性性质影响,采用成品荷载传感器将高估试件的破坏荷载,因此本文用Q235[14a槽钢自制荷载传感器,荷载由传感器四面应变的中间数值换算得到。

试件达到28 d龄期后以0.5~1.5 MPa/s的速度匀速加载,在进行抗压强度计算时,试件的承压面边长精确到1 mm。



(a) 立方体 (b) 棱柱体

图5 抗压强度试验

Fig.5 Test of compressive strength

1.4.2 墙体轴心受压试验

墙体轴心压力由50 t的MTS作动器施加,加载速度为0.5~1.5 MPa/s,墙顶加载板下铺设橡胶垫使作动器与试件充分接触,加载装置如图6所示。相似分析表明,轴力 $N_p = 4N_m$,应力 $\sigma_p = \sigma_m$,角标p表示原型,m表示模型。



图6 墙体轴心受压试验

Fig.6 Axially compression tests of wall

2 试验结果及分析

2.1 材料容重

每种配合比的材料容重取试件容重的平均值 γ_1 ,其实测结果如表5所示,其中 $\eta = (\gamma_1 - \gamma) / \gamma$ 。本文全部试件的容重平均值 $\gamma = 14.0 \text{ kN/m}^3$,可见第7~第9种配合比的材料容重 γ_1 低于平均容重 γ ,其余配合比的材料容重均大于平均容重,但最大仅大8.6%。

表5 材料的容重

Tab.5 Volume weights of materials

配合比 编号	立方体试件		棱柱体试件	
	$\gamma_1 / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\eta / \%$	$\gamma_1 / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\eta / \%$
1	14.5	3.6	14.0	0.0
2	14.8	5.7	14.3	2.1
3	14.4	2.9	15.0	7.1
4	14.5	3.6	14.9	6.4
5	14.2	1.4	14.8	5.7
6	14.9	6.4	15.2	8.6
7	13.5	-3.6	13.9	-0.7
8	13.5	-3.6	13.5	-3.6
9	13.3	-5.0	13.8	-1.4

试件的自重主要来源于磷石膏和磷渣微粉,磷石膏用量较低时,所需磷渣微粉的用量较高.对于第1—第3种配合比,磷渣微粉的占比为20%,试件的平均容重 $\gamma_1=14.4\text{ kN/m}^3$,第4—第6种配合比磷渣微粉的占比为17%,试件的平均容重为 $\gamma_1=14.8\text{ kN/m}^3$,第7—第9种配合比的磷渣微粉占比为9%,试件的平均容重为 $\gamma_1=13.6\text{ kN/m}^3$.总体而言,磷石膏用量越大,材料容重越小.在采用本文配合比时,建议现浇磷石膏的材料容重取为 $\gamma=14.0\sim 15.0\text{ kN/m}^3$.

2.2 破坏状态

2.2.1 立方体试件的破坏状态

立方体试件的典型破坏状态大体可分为锥形破坏和劈裂破坏两种.劈裂破坏面主要为垂直面和 45° 角面,如图7(a)所示;锥形破坏状态如图7(b)所示.两种破坏状态的试件数量大体相当,且破坏状态和材料配合比之间没有必然联系.试件破坏面上可见直径约 $3\sim 5\text{ mm}$ 空洞和石灰粉团,空洞是由于材料搅拌和凝结发热产生的气泡所致,这是现浇磷石膏的客观缺陷;对于石灰粉团,在混合干物料拌合时,应加强搅拌,以便尽可能予以消除.

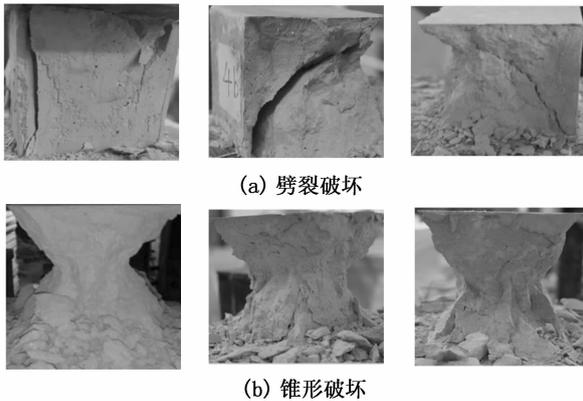


图7 立方体试件的典型破坏状态

Fig. 7 Typical failure modes of cubic specimens

2.2.2 棱柱体试件的破坏状态

棱柱体试件的破坏状态主要表现为劈裂破坏,部分试件被劈裂为多个柱体,破坏情况如图8所示.试件破坏面上仍然可见直径约 $3\sim 5\text{ mm}$ 的空洞和石灰粉团.试验过程中未见试件上产生斜向主裂缝.

2.2.3 墙体轴心受压的破坏状态

全部墙体试件均站立浇筑,其中Q-2b和Q-4a由于模板安装原因导致墙体垂直度偏差较大,手工打磨已不可能纠偏,因此破坏状态为墙体根部折断,其余试件的破坏状态主要表现为劈裂破坏,如图9

(a)所示.部分试件在加载板下约1倍墙厚位置可见水平走向的裂缝,如图9(b)所示,这主要是由于加载板下橡胶垫横向膨胀产生的水平力导致的.



图8 棱柱体试件的典型破坏状态

Fig. 8 Typical failure modes of prismatic specimens

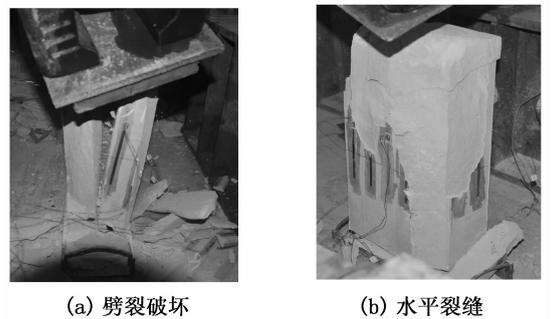


图9 墙体轴心受压试件的破坏状态

Fig. 9 Failure modes of axially compression wall

2.3 抗压强度测试结果

棱柱体试件3c和3f在脱模时尺寸损失严重而未加载.全部立方体试件和31个棱柱体试件的强度测试结果分别如表6和表7所示,表6和表7中还分别给出了文献[10]和文献[11]的测试结果.

由于目前尚无现浇磷石膏的试验方法,参考混凝土力学性能试验标准,本文每种配合比的抗压强度按下述原则评定:1)按测试结果的算术平均值计算抗压强度;2)当试件数量为3个时,如最大值或最小值中有一个与中间值的差值超过20%,以中间值作为抗压强度;如最大值和最小值与中间值的差值均超过20%,则测试结果无效;3)试件数量超过3个时,当最大值或最小值中有1个与中间值的差值超过20%,或两者均超过中间值的20%,则一并舍去最大值与最小值,按剩余结果的算术平均值计算抗压强度.

按照上述评定原则,由表6和表7得每种配合比的立方体抗压强度 f_{pu} 、棱柱体抗压强度 $f_{pu,1.0}$ 及对应变异系数,如表8所示,对于第3种配合比,由于本文的棱柱体试件仅有3b测得抗压强度值,故表8中未列入其棱柱体抗压强度结果.可见,相对于立

方体抗压强度 f_{pu} , 棱柱体抗压强度 $f_{pu,10}$ 的离散性较大. 将试件棱柱体强度与立方体强度之比近似取平均值, 可得:

$$f_{pu,10} = 0.806 f_{pu}. \quad (1)$$

将磷石膏现浇用于建筑结构的目的, 在于尽可

能提高磷石膏的利用率并获得较高的强度值, 本文第7种配合比中, 磷石膏的占比为85%, 试件的强度测试值较高, 对应 f_{pu} 与 $f_{pu,10}$ 的关系为:

$$f_{pu,10} = 0.825 f_{pu}. \quad (2)$$

表6 立方体试件抗压强度测试结果
Tab. 6 Test results for compressive strength of cubic specimens

试件编号	破坏荷载 /kN	抗压强度 /MPa									
1a*	34.35	3.5	4d*	30.70	3.0	7b*	102.02	10.4	74a	98.13	9.8
1b*	29.42	3.0	4e*	29.00	2.9	7c*	109.64	10.9	74b	108.24	10.6
1c*	35.98	3.7	4f*	35.50	3.5	7d*	106.24	10.4	74c	96.80	9.5
1a	36.07	3.5	4a	32.15	3.2	7e*	107.30	10.5	74d	93.34	9.1
1b	32.18	3.2	4b	30.11	3.0	7f*	94.60	9.6	74e	108.21	10.5
1c	31.84	3.1	4c	34.15	3.3	7g*	92.70	9.5	74f	110.10	10.8
2a*	81.84	8.2	5a*	39.60	4.0	7a	91.43	9.1	74g	106.84	10.5
2b*	89.36	9.1	5b*	46.30	4.6	7b	99.85	9.9	74h	112.97	11.1
2c*	90.62	9.2	5c*	46.40	4.7	7c	89.57	9.0	74i	114.69	11.2
2a	102.61	9.9	5a	46.03	4.5	7d	109.48	10.5	74j	105.44	10.3
2b	103.64	10.2	5b	39.79	3.9	7e	99.65	9.6	8a*	26.30	2.7
2c	110.19	10.9	5c	47.91	4.7	7f	108.21	10.4	8b*	28.87	2.9
3a*	30.51	3.1	6a*	100.14	10.2	7g	115.46	11.2	8c*	25.90	2.6
3b*	29.44	2.9	6b*	97.52	10.4	7h	110.70	10.6	8a	26.85	2.6
3c*	29.75	3.0	6c*	106.24	10.6	7i	111.81	11.0	8b	25.70	2.5
3d*	23.70	2.7	6d*	109.64	10.7	72a	115.85	11.6	8c	30.24	3.0
3e*	23.80	2.4	6e*	106.24	10.6	72b	111.88	11.2	9a*	39.26	4.0
3f*	23.70	2.3	6f*	113.00	11.1	72c	111.49	11.0	9b*	40.92	4.2
3a	26.61	2.6	6g*	102.02	10.2	72d	103.98	10.3	9c*	46.54	4.6
3b	26.77	2.7	6h*	116.00	11.4	72e	117.82	11.5	9a	41.09	4.1
3c	25.64	2.6	6a	95.04	9.5	72f	111.22	10.9	9b	34.12	3.4
4a*	29.35	2.9	6b	105.28	10.4	72g	88.67	8.7	9c	45.14	4.5
4b*	29.61	3.0	6c	98.20	9.8	72h	100.45	9.7			
4c*	29.87	3.0	7a*	101.71	10.4	72i	109.64	10.6			

注:1. 试件编号中标注*者为文献[10]的试验结果;2. 试件编号的第1个数字为配合比编号,字母为每种配合比试件的具体编号;3. 第7种配合比试件中,编号的第2个数字2和4分别表示缓凝剂掺入量为0.2%和0.4%,未注写第2个数字时,缓凝剂掺入量为0.3%.

表7 棱柱体试件抗压强度测试结果
Tab. 7 Test results for compressive strength of prismatic specimens

试件编号	破坏荷载 /kN	抗压强度 /MPa									
1a*	27.0	2.8	3b	28.4	2.8	6f*	89.5	9.1	74f	81.2	8.0
1d*	32.8	3.4	4c*	13.7	1.4	6d	107.0	10.5	8a*	21.3	2.2
1e*	29.3	3.0	4d*	20.5	2.1	6e	95.6	9.4	8d*	21.4	2.1
1b	25.5	2.5	4e*	9.0	0.9	6f	92.3	9.0	8f*	20.2	2.0
1d	27.8	2.8	4a	27.7	2.7	7a*	84.7	8.6	8d	22.3	2.2
1f	26.6	2.6	4e	33.8	3.3	7b*	94.7	9.5	8e	21.6	2.1
2a*	96.4	9.6	4f	34.7	3.4	7e*	88.0	9.0	8f	20.2	2.0
2e*	89.5	9.1	5d*	14.0	1.4	72a	89.7	8.9	9a*	28.6	2.9
2f*	94.0	9.6	5e*	23.6	2.4	72d	83.8	8.2	9b*	33.7	3.4
2a	73.4	7.3	5f*	19.3	2.0	72f	81.8	8.0	9e*	39.5	4.0
2c	86.6	8.6	5d	29.0	2.8	7d	82.4	8.2	9d	31.6	3.1
2e	80.7	7.9	5e	31.1	3.0	7e	88.6	8.8	9e	38.3	3.8
3c*	9.3	0.9	5f	33.8	3.3	7f	81.6	7.9	9f	36.1	3.6
3d*	12.8	1.3	6b*	56.3	6.0	74d	77.1	7.6			
3e*	11.5	1.2	6e*	96.0	9.8	74e	89.7	9.0			

注:1. 试件编号中标注*者为文献[11]的试验结果;2. 其余注同表6.

表8 抗压强度及其变异系数
Tab.8 Strength and variation coefficient

配合比 编号	立方体		棱柱体		$f_{pu,10}/f_{pu}$
	f_{pu}/MPa	δ_{fpu}	$f_{pu,10}/\text{MPa}$	$\delta_{fpu,10}$	
1	3.3	0.082	2.8	0.112	0.848
2	9.6	0.099	8.7	0.107	0.906
3	2.7	0.098	—	—	—
4	3.1	0.066	2.4	0.442	0.774
5	4.4	0.081	2.6	0.282	0.591
6	10.4	0.051	9.3	0.173	0.894
7	10.3	0.072	8.5	0.052	0.825
8	2.7	0.071	2.1	0.043	0.778
9	4.2	0.103	3.5	0.121	0.833

2.4 现浇磷石膏墙的可靠度分析及抗压强度设计值

采用第7种配合比浇筑的墙体,轴心受压状态下的破坏荷载 R_0 及材料抗压强度标准值 f_{pk} 如表9所示,其中 R_0 为试验实测值, f_{pk} 系根据表4的实测横截面尺寸按 R_0 换算得到。

由表9的 f_{pk} 测试结果取平均值,可将第7种配合比的材料抗压强度标准值评定为 $f_{pk}=5.8\text{ MPa}$,则与棱柱体抗压强度之比为0.68, f_{pk} 的变异系数为 $\delta_{fpk}=0.072$ 。故该组配合比的材料抗压强度标准值 f_{pk} 与立方体抗压强度 f_{pu} 的关系为:

$$f_{pk}=0.825\times 0.68f_{pu}=0.561f_{pu} \quad (3)$$

试件的破坏荷载标准值 R_k 按下式计算:

$$R_k=f_{pk}ab \quad (4)$$

式中: a,b 为墙体横截面边长。定义计算模型不确定性随机变量为:

$$\Omega_p=R_0/R_k \quad (5)$$

其计算结果如表9所示,则得其平均值为 $\mu_{\Omega_p}=1.015$,变异系数 $\delta_{\Omega_p}=0.13$ 。

表9 墙体荷载及抗力统计参数

Tab.9 Statistics parameters of load and resistance for wall

试件编号	R_0/kN	f_{pk}/MPa	R_k/kN	Ω_p
Q-1a	156.2	6.6	136.9	1.140
Q-1b	128.9	5.5	136.2	0.946
Q-2a	140.1	5.9	138.0	1.015
Q-3a	170.5	7.0	141.5	1.205
Q-3b	122.7	5.1	139.0	0.883
Q-4b	123.6	5.2	137.3	0.900

将墙体轴心受压承载力 R 表示为:

$$R=\Omega_p R_k \quad (6)$$

其平均值及变异系数可表示为:

$$\mu_R=\mu_{\Omega_p} \mu_{fpk} \mu_a \mu_b; \quad (7)$$

$$\delta_R=\sqrt{\delta_{\Omega_p}^2+\delta_{fpk}^2+\delta_a^2+\delta_b^2} \quad (8)$$

则可计算墙体的可靠指标 β 。

现以遵义市洪关乡两层现浇磷石膏承重墙农村

住宅(如图10所示)为基础进行墙体可靠度分析。承重墙按本文第7种材料配合比施工,墙体厚度为200 mm,按负荷面积计算的恒载标准值为 $N_{Gk}=39.5\text{ kN/m}$,活载标准值为 $N_{Qk}=13.1\text{ kN/m}$ 。由文献[13]可知,恒载平均值与标准值的比值 $K_G=1.06$,变异系数 $\delta_G=0.07$;活载平均值与标准值的比值 $K_Q=0.859$,变异系数 $\delta_Q=0.233$;几何尺寸平均值为 $\mu_a=a,\mu_b=b$,变异系数为 $\delta_a=\delta_b=0.01$ 。



(a) 墙体施工

(b) 竣工照片

图10 现浇磷石膏农村住宅

Fig.10 Residential building of country

墙体承载力设计值 R_d 按下式:

$$R_d=f_p ab \quad (9)$$

其中 $f_p=f_{pk}/\gamma_p$,为现浇磷石膏的抗压强度设计值, γ_p 为材料分项系数。

以 K_R 表示墙体受压承载力 R 的平均值 μ_R 与设计值 R_d 的比值,则由式(6)和式(7)得:

$$K_R=\mu_R/R_d=\gamma_p \mu_{\Omega_p} \quad (10)$$

即 $K_R=1.015\gamma_p$ 。

由 N_{Gk} 和 K_G 得恒载平均值为 $\mu_{NG}=41.87\text{ kN/m}$,由 μ_{NG} 和 δ_G 得其标准差为 $\sigma_{NG}=2.93\text{ kN/m}$;由 N_{Qk} 和 K_Q 得活载平均值为 $\mu_{NQ}=11.25\text{ kN/m}$,由 μ_{NQ} 和 δ_Q 得其标准差为 $\sigma_{NQ}=2.62\text{ kN/m}$ 。设墙体承载力设计值 R_d 等于荷载效应的组合设计值:

$$R_d=S=\gamma_G N_{Gk}+\gamma_Q N_{Qk} \quad (11)$$

取 $\gamma_G=1.2,\gamma_Q=1.4$,可得 $R_d=65.74\text{ kN/m}$,则由式(10)可得 R 的平均值为 $\mu_R=66.73\gamma_p\text{ kN/m}$,由式(8)可得 $\delta_R=0.15$,标准差为 $\sigma_R=10.01\gamma_p\text{ kN/m}$ 。当结构安全等级为二级时,脆性破坏的可靠指标 $\beta=3.7$,由

$$\beta=\frac{\mu_R-\mu_{NG}-\mu_{NQ}}{\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_{NG}^2+\sigma_{NQ}^2}} \quad (12)$$

可解得 $\gamma_p=1.84$ 。

鉴于现浇磷石膏具有高度脆性性质,在样本数量有限的情况下,参考砌体材料分项系数,建议现浇磷石膏的材料分项系数取为 $\gamma_p=1.9$ 。

对于本文提出的9种磷石膏配合比,结构现浇磷石膏强度与棱柱体试件强度之比近似取0.68,材料强度标准值 f_{pk} 与立方体试件强度 f_{pu} 的关系为:

$$f_{pk}=0.806\times 0.68 f_{pu}=0.55 f_{pu} \quad (13)$$

材料强度标准值 f_{pk} 与设计值 f_p 分别如表10所示。

一般以受压为主的工程结构中,总希望在相同材料用量条件下能获得较高的强度指标,按本文试验结果,建议现浇磷石膏的缓凝剂掺入量控制在 $0.2\% \sim 0.4\%$ 内,则其抗压强度设计值可取第2,6,7种配合比的抗压强度平均值,即 $f_p = 2.9 \text{ MPa}$ 。

表 10 材料抗压强度标准值与设计值
Tab. 10 Strength values of material

配合比编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_{pk}/MPa	1.8	5.3	1.5	1.7	2.4	5.7	5.7	1.5	2.3
f_p/MPa	0.9	2.8	0.8	0.9	1.3	3.0	3.0	0.8	1.2

3 结 论

1)不同磷酸厂排放的磷石膏,其石膏相不尽相同,当半水石膏的含量满足 GB/T9776《建筑石膏》的要求时,本文材料配合比可供工程应用参考,其中石灰用于中和磷石膏的酸性,磷渣微粉用于充填还原后的二水石膏晶体空隙以提高现浇磷石膏的耐水性,水泥主要用于消耗无水石膏,采用减水剂降低浇筑用水量,缓凝剂主要用来延缓石膏浆体的凝结时间。

2)按本文的材料质量配合比,现浇磷石膏的容重可取 $14.0 \sim 15.0 \text{ kN/m}^3$ 。

3)立方体试件的受压破坏主要为劈裂破坏和锥形破坏,棱柱体和墙体试件的受压破坏主要为劈裂破坏。破坏状态和材料配合比没有必然联系。

4)本文采用的掺合料,水泥对现浇磷石膏的抗压强度影响不大,而缓凝剂对其抗压强度影响显著,随缓凝剂用量增大,现浇磷石膏的抗压强度呈下降趋势,建议缓凝剂用量取 $0.2\% \sim 0.4\%$ 。全部试件的棱柱体抗压强度约为立方体抗压强度的 0.8 倍,墙体中的现浇磷石膏抗压强度约为棱柱体试件抗压强度的 0.68 倍。

5)可靠度分析表明,现浇磷石膏的材料分项系数可取 1.9 ,本文提供的抗压强度设计值可供工程应用参考,当缓凝剂掺入量为 $0.2\% \sim 0.4\%$ 时,现浇磷石膏的抗压强度设计值可取 2.9 MPa 。

参 考 文 献

[1] 韩青,罗康碧,李沪萍,等. 磷石膏的开发利用现状[J]. 化工科技, 2012,20(1):53-58.
HAN Qing,LUO Kang-bi,LI Hu-ping, et al. Development and utilization status on the phosphogypsum[J]. Science & Technology in Chemical Industry,2012,20(1):53-58. (In Chinese)

[2] TAHER M A. Influence of thermally treated phosphogypsum on the properties of Portland slag cement[J]. Resources, Conservation and

Recycling,2007,52(1):28-38.

[3] 钱晓倩,詹树林,金南国. 建筑材料[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2009:28-29.
QIAN Xiao-qian,ZHAN Shu-lin,JIN Nan-guo. Building materials [M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2009:28-29. (In Chinese)

[4] 马克俭,张华刚,高国富,等. 磷石膏在大开间灵活划分居室住宅建筑中的综合应用可行性研究报告[R]. 贵阳:贵州大学空间结构研究中心,2007:23-56.
MA Ke-jian,ZHANG Hua-gang,GAO Guo-fu, et al. Feasibility study report of phosphogypsum applied in residential building with flexible room and large space[R]. Guiyang:Space Structures Research Center of Guizhou University,2007:23-56. (In Chinese)

[5] 马克俭,高国富,张华刚,等. 节能与结构一体化新型钢筋混凝土结构体系[J]. 贵州工业大学学报:自然科学版,2008,37(4):34-43.
MA Ke-jian,GAO Guo-fu,ZHANG Hua-gang, et al. Energy-saving and structure integration of new reinforced concrete structure system [J]. Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science, 2008,37(4):34-43. (In Chinese)

[6] 曹建新,杨林,林倩,等. 磷建筑石膏墙体灌浆料及现场施工研究报告[R]. 贵阳:贵州大学化学与化工学院,2009:8-12.
CAO Jian-xin,YANG Lin,LIN Qian, et al. Study report of materials for phosphogypsum applied in wall and on scene construction[R]. Guiyang:College of Chemistry and Chemical Engineering, Guizhou University,2009:8-12. (In Chinese)

[7] 张华刚,梁凡凡,罗瑒,等. 基于现浇磷石膏的节能与结构一体化新型墙体结构及其应用[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2013,30(1):104-109.
ZHANG Hua-gang,LIANG Fan-fan,LUO Yang, et al. Energy-saving and structure integration of new-type wall structure based on cast-in-situ phosphogypsum and its application[J]. Journal of Guizhou University: Natural Science,2013,30(1):104-109. (In Chinese)

[8] 卢亚琴,胡岚,马克俭,等. 新型 RC 网格式框架结构墙体试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2013,40(4):8-14.
LU Ya-qin,HU Lan,MA Ke-jian, et al. Test research on the wall of new type RC grid frame structure[J]. Journal of Hunan University: Natural Science,2013,40(4):8-14. (In Chinese)

[9] 卢亚琴,张华刚,罗瑒,等. 现浇磷石膏墙体研究及性能试验分析[J]. 工业建筑,2014,44(4):60-64,103.
LU Ya-qin,ZHANG Hua-gang,LUO Yang, et al. Research and performance test analysis of cast-in-place phosphogypsum wall[J]. Industrial Construction,2014,44(4):60-64,103. (In Chinese)

[10] 罗瑒,张华刚,梁凡凡,等. 现浇磷石膏抗压强度影响因素的试验研究[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2013,30(2):86-89.
LUO Yang,ZHANG Hua-gang,LIANG Fan-fan, et al. Experimental research on influence factors of compressive strength for cast-in-situ phosphogypsum[J]. Journal of Guizhou University: Natural Science, 2013,30(2):86-89. (In Chinese)

[11] 梁凡凡,张华刚,罗瑒,等. 现浇磷石膏弹性模量和泊松比的初步试验研究[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2013,30(2):81-85.
LIANG Fan-fan,ZHANG Hua-gang,LUO Yang, et al. Preliminary experimental research on the elastic modulus and Poisson's ratio of cast-in-place phosphogypsum[J]. Journal of Guizhou University: Natural Science,2013,30(2):81-85. (In Chinese)

[12] 吴琴,张华刚,贾晓飞,等. 现浇磷石膏应力-应变曲线试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(5):150-157.
WU Qin,ZHANG Hua-gang,JIA Xiao-fei, et al. Experimental investigation on stress-strain curves of cast-in-situ phosphogypsum[J]. Journal of Building Structures,2015,36(5):150-157. (In Chinese)

[13] 沈在康. 混凝土结构设计新规范应用讲评[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1993:25,29.
SHEN Zai-kang. Application comments on the new code for design of concrete structures[M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 1993:25,29. (In Chinese)