

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.04.034

# 高掺量磷石膏稳定红黏土路用性能研究

杨德忠<sup>1</sup>, 陈开圣<sup>2\*</sup>, 李强<sup>2,3</sup>

(1. 黔南州交通建设养护发展中心, 贵州 都匀 558000; 2. 贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025;  
3. 眉山职业技术学院, 四川 眉山 620010)

**摘要:**针对磷石膏资源浪费和红黏土工程特性问题,参照二灰混合料配合比设计方法,室内配置18组配合比试样,通过击实试验、7 d无侧限抗压强度试验、水稳试验和CBR试验,对高掺量磷石膏稳定红黏土路用性能进行探索性研究。结果表明:高掺量磷石膏稳定红黏土的最佳含水率均小于素红黏土最佳含水率。7 d无侧限抗压强度为素红黏土的1.8~3.7倍。浸泡24 h后强度损失在50%以上,总体上水稳性较差。水玻璃能增强磷石膏稳定土的水稳性。随着磷石膏含量的增大,水稳系数越大。高掺量磷石膏稳定红黏土的CBR值远远大于素红黏土的CBR值,可以满足高速公路、一级公路上路床填料CBR值要求。结合路基的强度和水稳性要求,从降低水泥用量和提高磷石膏掺量的角度出发,建议水泥用量为4%,水玻璃掺量为2%,磷石膏:黏土=1:1。

**关键词:**高掺量;磷石膏;水泥;红黏土;路用性能

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A

贵州省境内碳酸盐岩分布地区的地表普遍分布着残积红黏土,覆盖厚度一般为5~7 m,最厚超过20 m。红黏土具有高含水率、高塑性、高孔隙比、胀缩性、裂隙性等工程性质,红黏土路基压实困难、水稳性差、路基表面易收缩开裂的特点大大影响了红黏土在公路工程中的应用<sup>[1-2]</sup>。针对红黏土的改良技术,最常见的方法是掺加水泥、石灰、砂、砂砾、碎石等。但这种方法存在以下缺点:石灰加固土:强度形成慢、干缩大、易开裂、水稳性差,施工进度慢<sup>[3-5]</sup>;水泥加固土:受土壤类别限制、易收缩开裂,且拌和均匀度难以保证;二灰稳定土:早期强度低、水稳性差<sup>[6-7]</sup>。

磷石膏是化工厂用磷石灰与硫酸作用湿法生产磷酸时产生的副产品。目前磷石膏生产工艺,每生产1 t磷胺就要排出4 t左右的磷石膏。以贵州省每年生产100万 t的产量计算,排放磷石膏每年为400万 t左右<sup>[8]</sup>。到目前为止,磷石膏还没有被很好地利用,处理方法多采用陆地堆放和江、湖、海填埋,这些方法既侵占土地又破坏植被,而且酸性废水的渗漏和部分放射性元素又给人类的生存造成污染,危害人类的健康。如何将磷石膏应用到红黏土路基中实现循环利用、变废为宝是广大科技工作者长期以来关注的问题。

磷石膏稳定土在中国道路工程中的理论与应用方面已有相关学者做了一些研究,但研究大部分只局限于某一方面的力学性能,众多的研究结果基本都得到相似的结论,即石灰(水泥):磷石膏=1:1~1:3<sup>[9-18]</sup>,磷石膏掺量低,且水稳性较差,这对于磷石膏的利用杯水车薪,缺乏高掺磷石膏稳定土的研究成果。该文针对磷石膏资源浪费和红黏土工程特性问题,室内配置18组配合比试样,通过击实试验、7 d无侧限抗压强度试验、水稳试验和CBR试验,对高掺量磷石膏水泥稳定红黏土路用性能进行探索性研究,为磷石膏在红黏土路基中的应用提供科学依据。

## 1 原材料

### 1.1 磷石膏

磷石膏取自贵州某地区露天堆积的工业废渣磷石膏,颜色呈灰白色,大多呈粉末状,伴有少量粒径大于20 mm的粗颗粒。放射性见表1,化学成分见表2。

根据GB 6566—2010《建筑材料放射性核素限量》中对建筑主体材料的要求,试验用的磷石膏可以用于公路建设中<sup>[19]</sup>。

收稿日期:2022-05-10(修改稿)

基金项目:贵州省科技支撑计划项目(编号:黔科合支撑[2020]4Y038号)

作者简介:杨德忠,男,高级工程师, E-mail:1640384788qq.com

\* 通信作者:陈开圣,男,博士,教授,博士生导师, E-mail:32084046@qq.com

表 1 磷石膏放射性检测结果

项目	$C_{Ra}/$ [Bq/ (kg) <sup>-1</sup> ]	$C_{Th}/$ [Bq/ (kg) <sup>-1</sup> ]	$C_k/$ [Bq/ (kg) <sup>-1</sup> ]	内照射 指数 ( $I_{Ra}$ )	外照射 指数 ( $I_r$ )
检测结果	89.41	3.75	46.27	0.4	0.3
技术要求	—	—	—	≤1.0	≤1.0
单项判定	—	—	—	合格	合格

## 1.2 红黏土

试样取自贵州省福泉牛场至道坪公路改扩建工程 K14+000~K16+000 段,取土深度 0~3 m,土样呈黄褐色,含有少许植物根茎、砾石等。土质均匀,结构致密,天然含水率高<sup>[20]</sup>。土样基本物理指标见表 3。

## 1.3 水泥

水泥为贵州产 P. O32.5 级普通硅酸盐水泥,其技术指标试验结果如表 4 所示。

表 2 磷石膏主要化学成分 %

SO <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
52.47	42.81	1.68	0.86	0.65	0.32	0.32	0.29	0.24

表 3 红黏土基本物理指标

天然含水 率/%	天然密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	最优含水 率/%	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	不均匀 系数	曲率 系数
36.25	1.92	19.57	1.687 4	53.12	29.71	23.41	17.84	1.92

表 4 水泥技术指标检测试验结果

项目	烧失量/ %	细度/ %	3 d 抗压 强度/MPa	3 d 抗折 强度/MPa	初凝时 间/min	终凝时 间/min	安定性
技术要求	≤5	≤10	≥15.0	≥3.5	≥45	≤600	必须合格
检测值	1.58	0.7	23.9	5.1	302	322	合格

表 5 水泥+磷石膏+红黏土配合比设计

编组	编号	水泥/ %	磷石膏: 红黏土	磷石膏/ %	红黏土/ %
A	A1	4	1:1	48.0	48.0
	A2		1:2	32.0	64.0
	A3		1:3	24.0	72.0
	A4		1:4	19.2	76.8
	A5		1:5	16.0	80.0
	A6		1:6	13.7	82.3
B	B1	5	1:1	47.5	47.5
	B2		1:2	31.7	63.3
	B3		1:3	23.8	71.3
	B4		1:4	19.0	76.0
	B5		1:5	15.8	79.2
	B6		1:6	13.6	81.4
C	C1	6	1:1	47.0	47.0
	C2		1:2	31.3	62.7
	C3		1:3	23.5	70.5
	C4		1:4	18.8	75.2
	C5		1:5	15.7	78.3
	C6		1:6	13.4	80.6

## 2 试验方案

### 2.1 配合比设计

通过分析现有的研究成果,参照二灰混合料配合比设计方法,水泥掺量为 4%、5%和 6%,磷石膏和红黏土配比分别为 1:1、1:2、1:3、1:4、1:5 和 1:6,配置 18 组配合比试样(表 5),室内进行击实试验、7 d 无侧限抗压强度试验、CBR 试验和水稳定性试验。根据水稳定性试验结果确定是否需要加入稳定剂及稳定剂的掺量。

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 样品制备

样品制备根据试验所需的土样数量,将碾散后的土样过筛,物理试验过 0.5 mm 筛,水理及力学试验过 2 mm 筛,用四分法取出代表性试样,按照 JTG E40—2007《公路土工试验规程》、JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》计算干土质量、所需的加水量,充分搅拌后装入容器,焖料一昼夜。试样成型方法采用压样法制样。

## 2.2.2 击实试验

按照配合比和目标含水率,分别称量磷石膏和红黏土干质量,加入适量水,搅拌后装入塑料袋闷料备用。根据JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》规定,水泥在击实前逐个加入浸润后的混合料中,同时加入预留3%的水,搅拌均匀,开始击实试验。试验均在加水泥后1 h内完成。

## 2.2.3 无侧限抗压强度试验及水稳试验

将压实度为95%,含水率为19.6%,直径和高均为50 mm的两组试样放入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为95%以上的标准养护箱中养护。一组试样养护7 d后用微机控制压力机进行7 d无侧限抗压强度试验,另外一组标准养护6 d,最后一天浸泡24 h,进行水稳试验。

## 2.2.4 CBR 试验

试验按照JTG E40—2007《公路土工试验规程》进行,将静压制备完成的试样放入水槽中浸水96 h,测其膨胀量,利用路面强度仪进行贯入试验。

# 3 试验结果分析

## 3.1 击实试验和无侧限抗压强度试验结果

最佳含水率、最大干密度与磷石膏:红黏土配比的关系如图1、2所示。

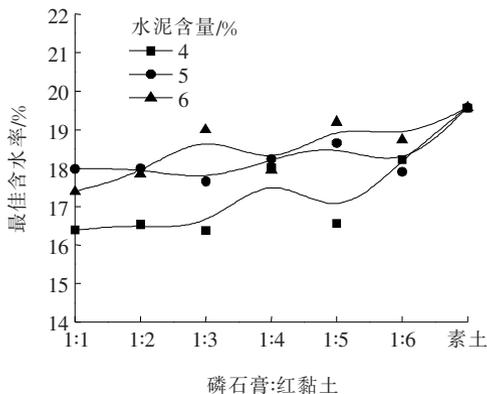


图1 最佳含水率与不同配比的关系

由图1可知:高掺量磷石膏水泥稳定红黏土的最佳含水率为16.37%~19.19%,均小于素红黏土最佳含水率。由图2可知:随着磷石膏:红黏土中红黏土配比增大,最大干密度增大,在磷石膏:红黏土=1:1~1:3时,最大干密度增加较快,磷石膏:红黏土=1:4~1:6时,最大干密度增加缓慢,基本趋于平缓。总体上干密度变化不大,原因是击实试验均在加水泥后1 h内完成,水泥固结作用来不及完成,所以干密度

变化不大。

图3为7 d无侧限抗压强度与磷石膏:红黏土配比关系。

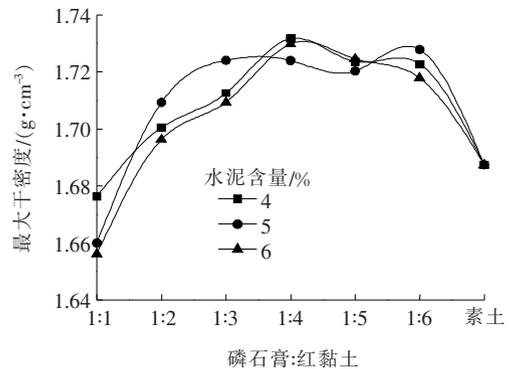


图2 最大干密度与不同配比的关系

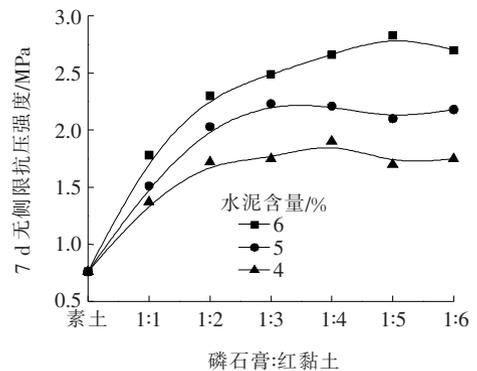


图3 7 d无侧限抗压强度与不同配比关系

由图3可知:高掺量磷石膏水泥稳定红黏土7 d无侧限抗压强度为1.37~2.83 MPa。为素红黏土7 d无侧限抗压强度(0.76 MPa)的1.8~3.7倍。随着水泥含量增多,7 d无侧限抗压强度越大。随着磷石膏:红黏土中红黏土配比增大,7 d无侧限抗压强度增大,在磷石膏:红黏土=1:1~1:3时,7 d无侧限抗压强度增加较快,磷石膏:红黏土=1:4~1:6时,7 d无侧限抗压强度趋于平缓。

## 3.2 水稳试验结果分析

### 3.2.1 无稳定剂的水稳试验结果

由图4~6为不同水泥含量、不同配比的试样的水稳试验结果。

从图4~6可以看出:水泥含量为4%时,高掺量磷石膏水泥稳定红黏土浸泡24 h后只有A1(磷石膏:红黏土=1:1)能保持完整,A2出现较宽的竖向贯通裂缝并且局部脱落,A3~A6均坍塌破坏;水泥含量为5%时,B1~B3(磷石膏:红黏土=1:1、1:2和1:3)浸泡24 h后基本保持完整,B3局部开裂,B4~B6出现了不同程度的裂缝,局部脱落,最终坍塌破坏;

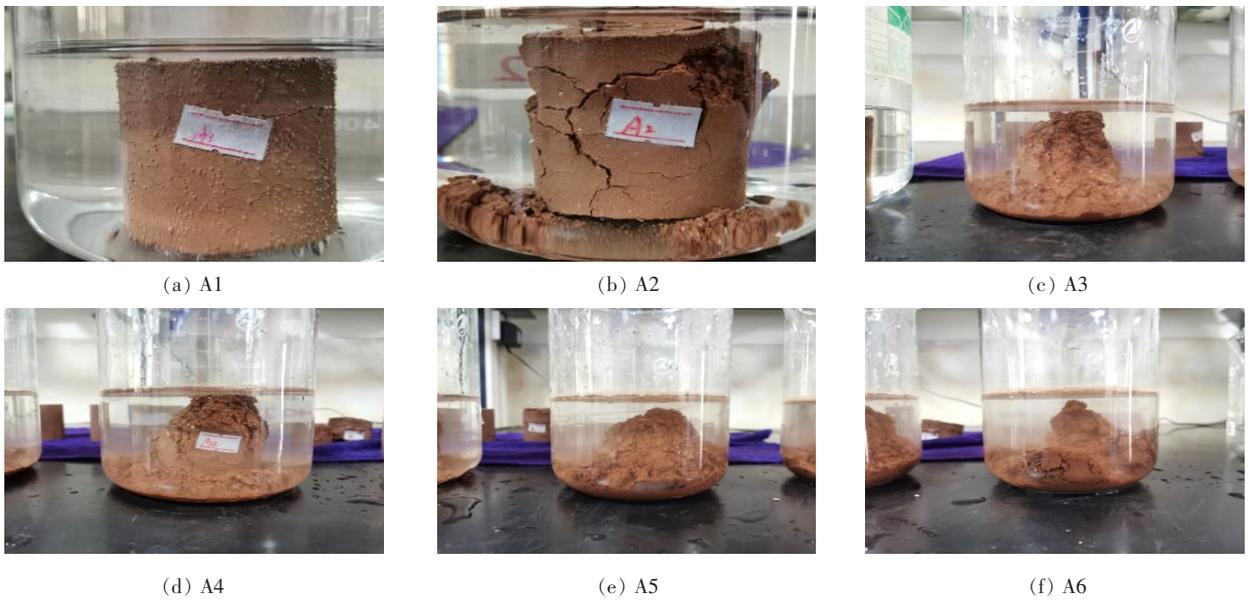


图 4 水泥含量为 4% 不同配比试样浸泡 24 h 后结果

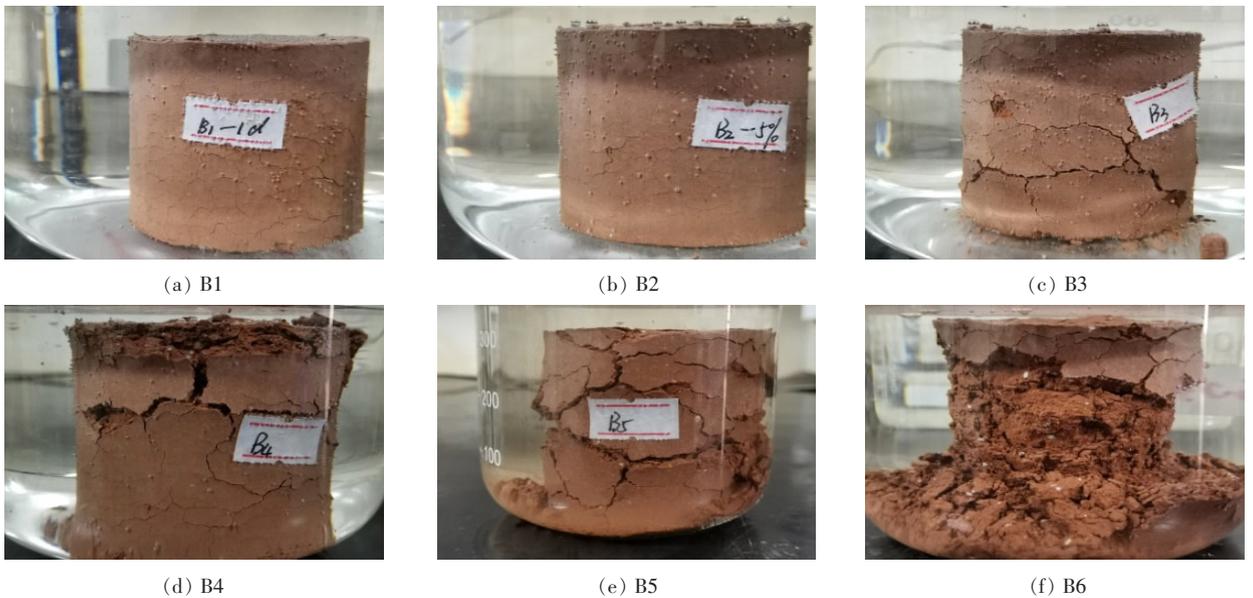


图 5 水泥含量为 5% 不同配比试样浸泡 24 h 后结果

水泥含量为 6% 时, C1、C2、C5 (磷石膏: 红黏土 = 1: 1、1: 2 和 1: 5) 浸泡 24 h 后基本保持完整, 出现细小裂纹, C3 和 C4 裂缝宽度较大, 表面脱落, C6 坍塌破坏。说明磷石膏含量越多, 试样越能保持完整, 水稳性越好。

为了进一步验证水稳性试验强度结果, 对水稳后基本保持完整的试样进行 7 d 无侧限抗压强度试验。为定量表征磷石膏综合稳定土的浸泡后强度损失情况, 引入强度损失率 =  $[(7 \text{ d 无侧限抗压强度} - \text{标养 6 d 浸水 1 d 无侧限抗压强度}) / (7 \text{ d 无侧限抗压强度})] \times 100$ 。结果如图 7 所示。

由图 7 可知: 磷石膏稳定土浸泡 24 h 后强度损失均在 50% 以上, 总体上水稳性较差。

### 3.2.2 添加稳定剂后水稳试验结果

为探讨解决磷石膏稳定土水稳性差的问题, 根据上文研究成果, 磷石膏: 红黏土为 1: 1、1: 2、1: 3 时水稳性相对较好, 故选用以上 3 个配比通过添加稳定剂进一步开展水稳试验。通过分析现有研究成果, 在磷石膏稳定土中添加水玻璃, 掺量取 2%、4%、6%, 水泥含量取 4%, 压实度控制在 95%。引入水稳系数 =  $\frac{\text{加水玻璃后浸水抗压强度}}{\text{不加水玻璃浸水抗压强度}}$ 。水稳试验结果见图 8~11。

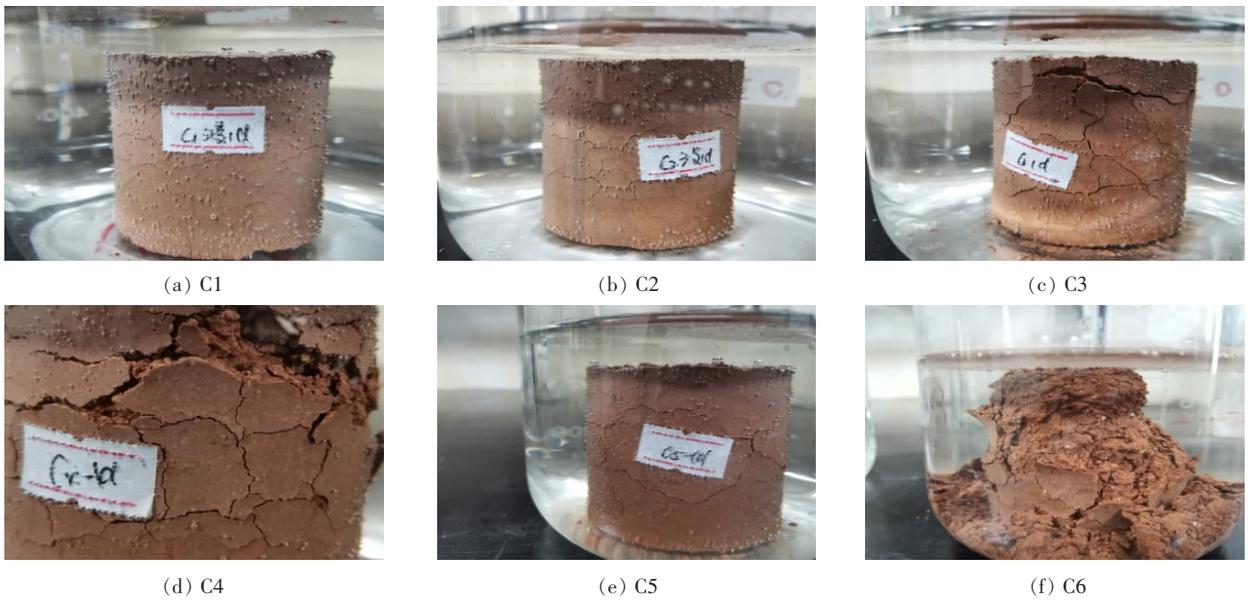


图6 水泥含量为6%不同配比试样浸泡24 h后结果

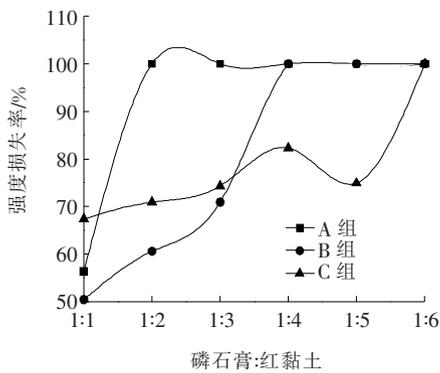


图7 强度损失率与配比的关系

由图8~11可知,磷石膏:红黏土为1:1、1:2、1:3加入2%、4%、6%水玻璃后,试样浸水后完整性较好,水稳系数均大于1,说明水玻璃能增强磷石膏稳定土的水稳性。随着磷石膏含量的增大,水稳系数越大。随着水玻璃含量增大,水稳系数减小。综合考虑磷石膏用量和水玻璃经济性,建议水玻璃用量为2%,磷石膏:红黏土=1:1。

### 3.3 CBR 试验结果

基于无侧限抗压强度和水稳试验结果,选取磷石膏:红黏土为1:1、1:2、1:3,水泥含量为4%、5%、

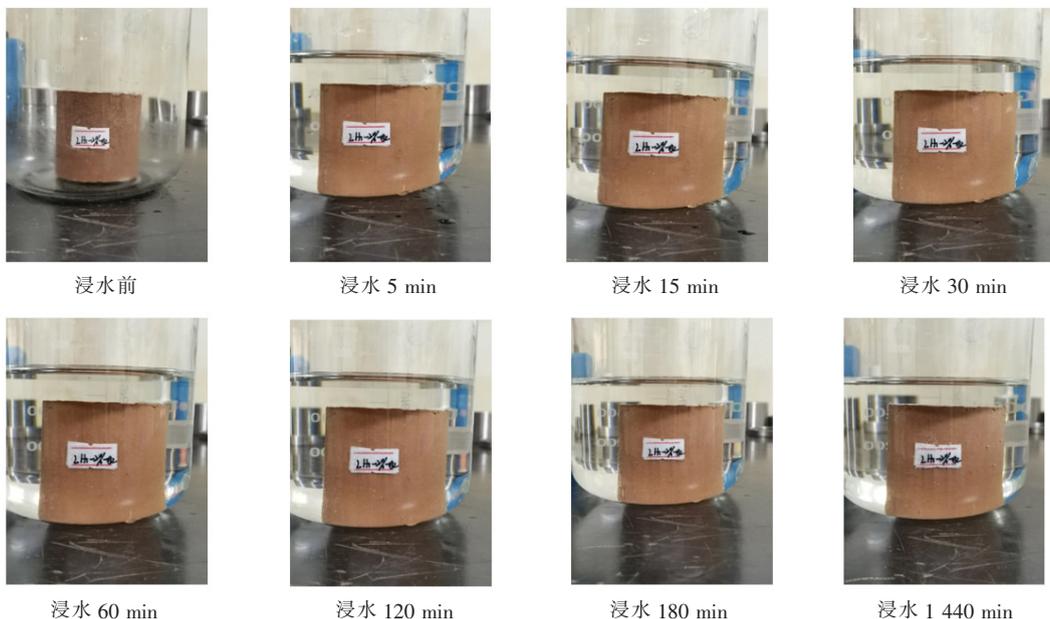


图8 水玻璃掺量2%、磷石膏:红黏土=1:1浸泡试验结果

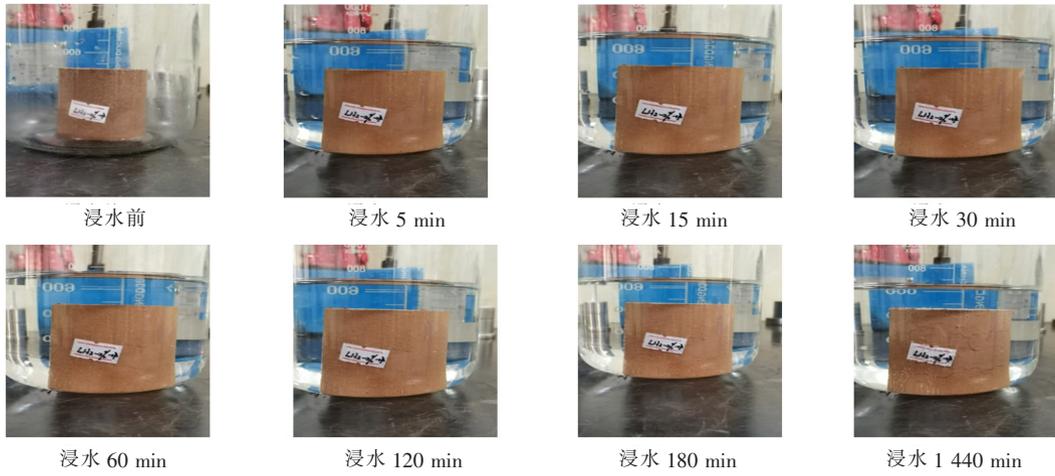


图 9 水玻璃掺量 2%、磷石膏：红黏土=1：2 浸泡试验结果

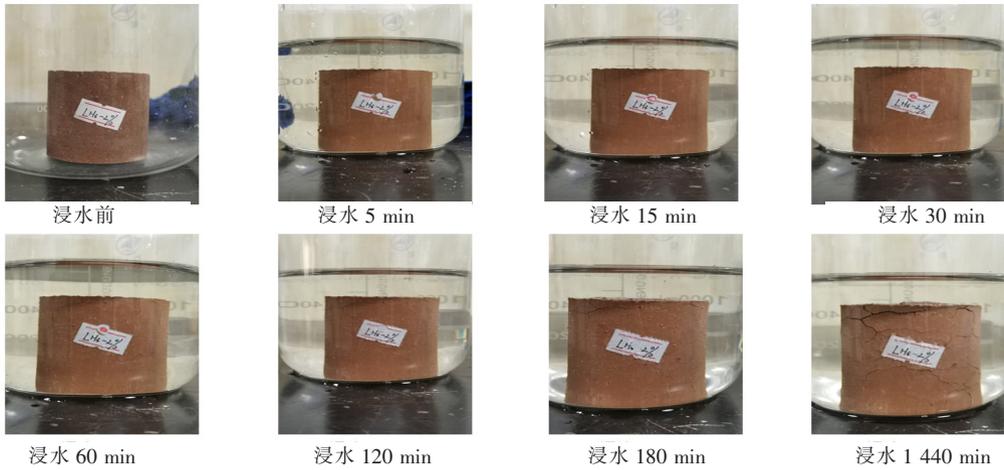


图 10 水玻璃掺量 2%、磷石膏：红黏土=1：3 浸泡试验结果

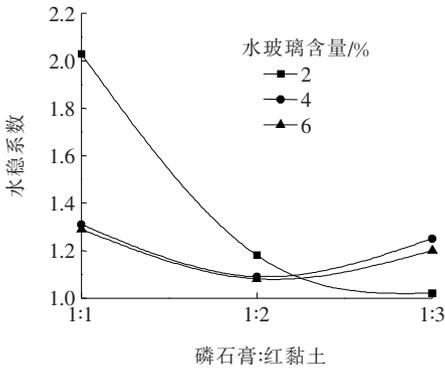


图 11 水稳系数与配比的关系

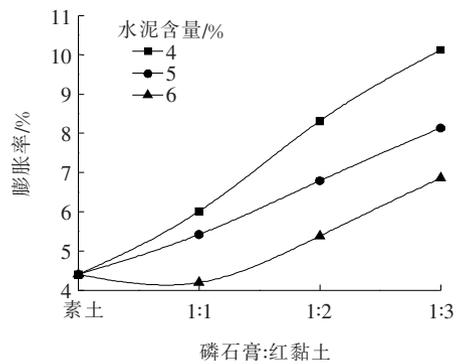


图 12 不同配比与膨胀率之间的关系

6%共 3 组试样进行 CBR 试验。试样含水率为 19.57%，压实度为 96%。试验结果如图 12、13 所示。

由图 12、13 可知：磷石膏稳定红黏土的 CBR 值远远大于素红黏土的 CBR 值，根据 JTG D30—2015《公路路基设计规范》对于不同公路等级各路基部位的

CBR 值要求，磷石膏：红黏土为 1：1、1：2、1：3，水泥含量为 4%、5%、6% CBR 值可以满足高速公路、一级公路上路床填料 CBR 值要求。随着磷石膏含量增大，CBR 值增大，膨胀率减小。水泥含量越高，膨胀率越小，CBR 值越大。

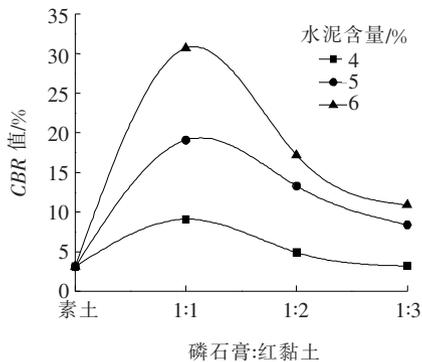


图 13 不同配比与 CBR 值之间的关系

## 4 结论

(1) 高掺量磷石膏稳定红黏土的最佳含水率为 16.37%~19.19%，最大干密度为 1.66~1.73 g/cm<sup>3</sup>，均小于素红黏土最佳含水率，总体上干密度变化不大。

(2) 高掺量磷石膏稳定红黏土 7 d 无侧限抗压强度为 1.37~2.83 MPa。为素红黏土 7 d 无侧限抗压强度(0.76 MPa)的 1.8~3.7 倍。磷石膏:红黏土=1:1~1:3 时,7 d 无侧限抗压强度增加较快,磷石膏:红黏土=1:4~1:6 时,7 d 无侧限抗压强度趋于平缓。

(3) 高掺量磷石膏稳定红黏土浸泡 24 h 后强度损失均在 50%以上,总体上水稳性较差。磷石膏含量越多,水稳性相对较好。水玻璃能增强磷石膏稳定土的水稳性。随着磷石膏含量的增大,水稳系数越大。随着水玻璃含量增大,水稳系数越小。

(4) 高掺量磷石膏稳定红黏土的 CBR 值远远大于素红黏土的 CBR 值,可以满足高速公路、一级公路上路床填料 CBR 值要求。随着磷石膏含量增大, CBR 值增大,膨胀率减小。水泥含量越高, CBR 值越大,膨胀率越小。

(5) 结合路基的强度和水稳定性要求,从降低水泥用量和提高磷石膏的角度出发,建议水泥用量为 4%,水玻璃掺量为 2%,磷石膏:红黏土=1:1。

### 参考文献:

[1] 贵州省交通运输厅. 贵州特殊土方路基设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2015.

[2] 贵州省地方标准. 贵州省红黏土和高液限土路基设计与施工技术规范:DB 52/T 1041—2015[S]. 贵州省质量技术监督局,2015.

[3] 郭彪,李亚军,叶咸,等. 干湿效应作用下改良红黏土路基长期性能试验研究[J]. 公路工程,2017,42(5):273—277,288.

[4] 刘之葵,邱晓娟,雷轶. 水泥改良桂林红黏土的试验研究[J]. 公路工程,2016,41(1):6—9.

[5] 王志刚. 冻融循环作用下改良红黏土的力学特性研究[J]. 交通科学与工程,2016,32(1):13—16.

[6] 杨俊,黎新春,童磊. 风化砂改良高液限红黏土强度特性试验研究[J]. 南京理工大学学报,2015,39(2):181—186.

[7] 罗斌,赵雄. 碎石改良高液限红黏土的试验研究[J]. 公路工程,2009,34(2):131—134.

[8] 廖若博,徐晓燕,纪罗军,等. 我国磷石膏资源化应用的现状及前景[J]. 硫酸工业,2012(3):1—7.

[9] 孙家瑛. 废石膏改性二灰碎石基层的设计与施工工艺[J]. 中外公路,2004,24(5):85—87.

[10] 董满生,凌天清,肖文. 工业废料磷石膏在路基工程中的应用[J]. 华东公路,2001,130(3):55—58.

[11] 唐庆黔,凌天清,董满生. 工业废料磷石膏在路基路面工程中的应用[J]. 山东交通学院学报,2002,10(2):49—52.

[12] 沈卫国,周明凯,赵青林,等. 粉煤灰磷石膏高早强路面基层材料的研究[J]. 粉煤灰综合利用,2001(2):31—32.

[13] SHEN Weiguo, ZHOU Mingkai, ZHAO Qinglin. Study on Lime-Fly Ash-Phosphogypsum Binder[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21:1480—1485.

[14] SHEN Weiguo, ZHOU Mingkai, ZHA Jin, et al. Research on the Proportion Design of Phosphogypsum Modification Lime Fly-Ash Road Base Material[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(10):19—22.

[15] 徐雪源. 磷石膏及其混合料的工程特性研究[D]. 南京:河海大学,2005.

[16] 李章锋. 磷石膏改良土用作路基及基层填料的试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.

[17] 瓦浩. 磷渣(磷石膏)路面基层材料的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2008.

[18] 陶松. 工业废渣磷石膏用作道路填料的性能研究[D]. 武汉:武汉工业学院,2012.

[19] 中国建筑材料科学研究院,卫生部工业卫生实验所,中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所,中国建筑材料工业地质勘查中心,等. 建筑材料放射性核素限量:GB 6566—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.

[20] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程:JTG E40—2007[S]. 北京:人民交通出版社,2007.