

引用本文:陈开圣,张 坤,胡 兴,等.磷石膏稳定土临界动应力及累积变形特性研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(6):170-180.
CHEN Kaisheng,ZHANG Kun,HU Xing,et al. Study on critical dynamic stress and cumulative deformation characteristics of phosphogypsum stabilized soil[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2023,40(6):170-180.

DOI:10.19815/j.jace.2022.01006

磷石膏稳定土临界动应力及累积变形特性研究

陈开圣,张 坤,胡 兴,王 磊

(贵州大学 土木工程学院,贵州 贵阳 550025)

摘要:针对磷石膏的资源浪费和红黏土的特殊工程特性,以水泥(石灰)为固化剂,采用SDT-20动三轴试验研究了磷石膏稳定土的疲劳特性和改良机理,建立了累积变形模型和临界动应力模型,得到了混合料动强度指标。结果表明:随着动应力幅值与围压提高,累积变形特征显著增大,且素红黏土与磷石膏稳定土变形均经历稳定型、临界型与破坏型三阶段;临界动应力随围压的增大而线性增大,降低动应力水平和提高围压可提升路基抵抗失稳的能力;石灰磷石膏稳定土和水泥磷石膏稳定土动抗剪强度相比素红黏土有大幅提升,且水泥磷石膏稳定土的动抗剪强度增加值比石灰磷石膏稳定土更大;磷石膏稳定土强度提升是由水泥(石灰)和磷石膏共同作用引起的,水泥(石灰)反应生成水化硅酸钙(C—S—H凝胶),磷石膏反应生成钙矾石,两者相互交织形成空间网状结构。

关键词:磷石膏稳定土;改良机理;临界动应力;累积变形;动强度

中图分类号:TU446

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)06-0170-11

Study on critical dynamic stress and cumulative deformation characteristics of phosphogypsum stabilized soil

CHEN Kaisheng, ZHANG Kun, HU Xing, WANG Lei

(College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: In view of the resource waste of phosphogypsum and the special engineering characteristics of red clay, the fatigue characteristics and improvement mechanism of phosphogypsum stabilized soil were studied by SDT-20 dynamic triaxial test with cement (lime) as curing agent. The cumulative deformation model and critical dynamic stress model were established, and the dynamic strength index of the mixture was obtained. The results show that the cumulative deformation characteristics increase significantly with the increase of dynamic stress amplitude and confining pressure, and the deformation of plain red clay and phosphogypsum stabilized soil experiences three stages including stable type, critical type and failure type. The critical dynamic stress increases linearly with the increase of confining pressure. Reducing the level of dynamic stress and increasing confining pressure can improve the ability of subgrade to resist instability. The dynamic shear strengths of lime phosphogypsum stabilized soil and cement phosphogypsum stabilized soil is significantly higher than that of plain red clay, and the increase value of dynamic shear strength of cement phosphogypsum stabilized soil is greater

收稿日期:2023-01-05

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2023]重点 016,黔科合支撑[2020]4Y038 号)

作者简介:陈开圣(1975-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:chen_kaisheng@163.com。

than that of lime phosphogypsum stabilized soil. The strength enhancement of phosphogypsum stabilized soil is the joint action of cement (lime) and phosphogypsum. The cement (lime) reacts to form calcium silicate hydrate (C—S—H gel), the phosphogypsum reacts to form ettringite AFt, and the two are intertwined to form a spatial network structure.

Key words: phosphogypsum stabilized soil; improvement mechanism; critical dynamic stress; cumulative deformation; dynamic strength

0 引 言

随着中国高速公路和高速铁路的迅速发展,路基稳定性在公路和铁路的建设中起至关重要的作用^[1]。路基承受高速列车驶过产生的循环动荷载,导致路基不断产生累积变形,很可能使路基沉降大于附加沉降允许值,这种永久变形对路基的动力稳定性非常不利。路基混合料的累积变形曲线可分为稳定型曲线(平缓型曲线)、临界型曲线(波动型曲线)和破坏型曲线(弯曲型曲线)3 种类型。在循环荷载作用初期,随着振次的增大,变形增速较快;随着试样逐渐变得密实,变形增速变小,此时的动应力水平较低;在振动次数达到一定次数后只产生弹性变形,变形趋于稳定状态,这种曲线为稳定型曲线。在学界主要有 2 种公式描述,Stewart 等^[2-3]用 $\epsilon_p = \alpha[1 + \beta \log(N)]$ 来拟合累积塑性应变随振动的变化关系,刘晓红^[4]则主张用 $\epsilon_p = \alpha N^B / (1 + \gamma N^B)$ 描述,式中 ϵ_p 为累积塑性应变, α 、 β 、 γ 、 B 是与动应力水平、土的性质等因素有关的拟合参数, N 为加载次数。在较高动应力水平下,随着振次的增大,变形不断增大,增速越来越快,动强度不断减小,直到路基破坏,这种曲线为破坏型曲线。余周^[5]用 $\epsilon_p = ae^{bN}$ 来近似描述这一波动状态,式中 ϵ_p 为循环单级加载下的残余应变, N 为试验振动次数, a 、 b 为试验拟合参数。累积变形很复杂,时大时小,较为波动,此时状态介于稳定状态和破坏状态之间,这种曲线为临界型曲线,蔡英等^[6-7]用 $\epsilon = AN^b$ 描述破坏曲线,式中 A 、 b 的数值取决于动应力水平和土的性质, N 为加载次数。对于临界动应力、动强度,国内外学者进行了大量研究。Seed 等^[8-10]在研究交通荷载对公路路基土强度和变形影响的工作中,首次采用了应力控制和循环加载的动三轴仪,使试件轴向累积应变达到一定值,用此时的循环荷载与相应的振动次数关系曲线作为评价土的动强度标志,并将其推广到了地震作用下饱和黏性土的强度问题。Sangrey 等^[11]研究了低速下黏土应力与应变的关系。彭社琴等^[12]通过动三轴试验,研究了成都地区具有代表

性的两类土的动强度,获得了动强度指标及相关研究成果。商拥辉等^[13]在不同荷载条件下通过水泥改良膨胀土的室内动三轴试验,研究其临界动应力的变化规律,并建立了填料累积变形经验模型。胡萍等^[14]通过软岩改良土的动三轴试验研究其动强度的变化规律,结果表明在列车荷载下竖向动应力和动位移幅值波动范围分别为 15.5~19.5 kPa 和 0.05~0.35 mm,且掺入 5% 水泥的改良土可用于其基床底层及路基填料。

红黏土广泛分布于中国南方地区,因其具有高含水率、高液限、高塑性等特殊不良工程特性,大大影响了红黏土在工程中的应用^[15-18]。磷石膏是化工厂湿法生产磷酸时产生的副产品。按目前磷石膏生产工艺,每生产 1 t 磷铵就要产生 4~5 t 的磷石膏,以贵州年生产 1×10^6 t 的生产量推算,每年总排放磷石膏 $4 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$ t。磷石膏常见处理方法为陆地堆放和江、湖、海填埋,这些方法既侵占土地又破坏植被,且酸性废水的渗漏和部分放射性元素会污染人类的生存环境,危害人类健康。大量废弃的磷石膏再利用不仅有利于环境保护,也有益于资源节约^[19]。近年来,相关研究多集中于水泥或石灰改良膨胀土和改良砂的动力特性,对于磷石膏稳定红黏土的动力特性却少有报道。本文通过动三轴试验研究了不同配比、围压和动应力水平下混合料的疲劳特性,分析累积变形与振次之间的关系曲线,建立累积变形模型,确定临界动应力、动强度指标,为磷石膏稳定土疲劳特性的进一步研究积累宝贵资料,为高速公路和高速铁路的建设提供参考。

1 原材料基本性能

本文所采用的磷石膏取自贵州省福泉市瓮福磷矿堆场,呈灰白色粉末状,天然含水率为 25%~35%,主要含 CaO 和 SO_3 等化学成分。磷石膏的化学成分见表 1,放射性检测结果见表 2,危害成分检测结果见表 3。石灰为白色粉末状,干燥,无结块,主要成分为 CaO,其化学成分见表 4。水泥品种为 P. O32.5 普通硅酸盐水泥,灰色,不含水分,其技术

表 1 磷石膏化学成分

Table 1 Chemical composition of phosphogypsum

化学成分	SO ₃	CaO	SiO ₂	F	P ₂ O ₅	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
质量分数/%	49.070 0	40.070 0	5.780 0	1.890 0	1.350 0	1.310 0	0.070 0	0.210 0
化学成分	MgO	Cl	SrO	K ₂ O	BaO	TiO ₂	其他	
质量分数/%	0.195 0	0.095 5	0.090 1	0.074 4	0.071 1	0.042 0	0.039 9	

表 2 磷石膏放射性检测结果

Table 2 Radioactive test results of phosphogypsum

检测项目	技术要求	检测结果	单项判定	检测结论
镭-226 放射性比活度(CRa)/(Bq·kg ⁻¹)		53.94		该样品所检项目符合《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566—2010)国家标准要求
钍-232 放射性比活度(CTh)/(Bq·kg ⁻¹)		42.13		
钾-60 放射性比活度(CK)/(Bq·kg ⁻¹)		52.95		
内照射指数(IRa)	≤1.0	0.3	符合	
外照射指数(Ir)	≤1.0	0.3	符合	

表 3 磷石膏浸出液中危害成分检测结果

Table 3 Test results of hazardous components in phosphogypsum leaching solution

检测项目	技术要求	检测结果	单项判定	检测结论
铜(以总铜计)含量/(mg·L ⁻¹)	100	0.157 0	符合	符合《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)国家标准要求
锌(以总锌计)含量/(mg·L ⁻¹)	100	0.051 0	符合	
镉(以总镉计)含量/(mg·L ⁻¹)	1	未检出	符合	
铅(以总铅计)含量/(mg·L ⁻¹)	5	未检出	符合	
总镉/(mg·L ⁻¹)	15	未检出	符合	
砷(以总砷计)含量/(mg·L ⁻¹)	5	0.035 6	符合	
汞(以总汞计)含量/(mg·L ⁻¹)	0.1	0.000 5	符合	

表 4 石灰化学成分

Table 4 Chemical composition of lime

化学成分	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SrO
质量分数/%	97.950 0	0.460 0	0.439 0	0.384 0	0.382 0	0.122 0	0.083 1	0.032 5
化学成分	Cl	CeO ₂	Ag ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Dy ₂ O ₃	其他	
质量分数/%	0.027 9	0.022 2	0.017 2	0.014 5	0.013 9	0.010 6	0.041 1	

指标见表 5。红黏土取自贵州大学某天然边坡,颜色以棕红色为主,土样较湿,含水率较高,土质较均匀,结构致密,基本物理力学指标见表 6。

2 试验方案

2.1 试验仪器

本次疲劳动力试验采用 SDT-20 型动三轴试验机,该仪器主要由围压施加机构、液压油源系统、轴

向加载机构和框架、压力室举升机构、压力室、气和水施加管道系统、电气控制系统 7 个部分组成。

2.2 配合比设计

Motz 等^[20]通过室内试验确定磷石膏与二灰混合料的合理配比为:石灰掺量为 6%~11%,磷石膏掺量为 0%~65%,粉煤灰与石灰掺量比值为 3~10,混合料强度随石灰和磷石膏掺量的增大而减小。瓦浩^[21]通过试验得到磷石膏与粉煤灰的合理配比

表 5 水泥技术指标

Table 5 Technical indexes of cement

指标参数	SO ₃ 含量/%	MgO 含量/%	烧失量/%	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	初凝时间/min	终凝时间/min
国家标准	≤3.5	≤5.0	≤5.0	≥300	≥45	≤600
实测值	2.20	1.98	4.14	348	166	221
检测项目	安定性	氯离子含量/%	3 d 抗折强度/MPa	3 d 抗压强度/MPa	助磨剂(醇胺类)掺量/%	
国家标准	必须合格	≤0.06	≥3.5	≥17.0	≤0.5	
实测值	合格	0.018	5.9	29.2	0.10	

表 6 红黏土基本物理及力学性能

Table 6 Basic physical and mechanical properties of red clay

天然含水率/%	不均匀系数	曲率系数	相对密度	粒径分布比例/%		
				<0.002 mm	0.002~0.05 mm	0.5~2 mm
35.78	8.60	1.40	2.61	69.73	30.00	0.23
塑限/%	液限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	天然湿密度/(g·cm ⁻³)	天然干密度/(g·cm ⁻³)
28.17	51.42	23.25	18.56	1.525	1.807	1.331

为 1:1~1:3,且石灰掺量 6%~8%为佳。《公路路面基层施工技术细则》(JTGT F20—2015)^[22]规定水泥稳定材料若作为底基层,且塑性指数大于等于 12,水泥剂量为 6%~14%。从节约水泥和石灰角度出发,本文试验将水泥与石灰含量定为 4%、6%、8%。众多学者研究表明,水泥(石灰)与磷石膏的配比在 1:1~1:3 之间混合料力学性能最好^[23-27],本文将水泥(石灰)与磷石膏的配比拟定为 1:1、1:2、1:3,磷石膏稳定土配合比如表 7 所示。

2.3 试样制备

根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[28]和《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)^[29],称取一定量的磷石膏和

表 7 磷石膏稳定土配合比设计

Table 7 Mix proportion design of phosphogypsum stabilized soil			
编号	水泥、磷石膏、红黏土配合比	编号	石灰、磷石膏、红黏土配合比
a1	4:4:92	b1	4:4:92
a2	4:8:88	b2	4:8:88
a3	4:12:84	b3	4:12:84
a4	6:6:88	b4	6:6:88
a5	6:12:82	b5	6:12:82
a6	6:18:76	b6	6:18:76
a7	8:8:84	b7	8:8:84
a8	8:16:76	b8	8:16:76
a9	8:24:68	b9	8:24:68

表 8 磷石膏红黏土混合料无侧限抗压强度试验结果

Table 8 Unconfined compressive strength test results of phosphogypsum red clay mixture							
编号	水泥、磷石膏、红黏土配合比	7 d 无侧限抗压强度/MPa	28 d 无侧限抗压强度/MPa	编号	石灰、磷石膏、红黏土配合比	7 d 无侧限抗压强度/MPa	28 d 无侧限抗压强度/MPa
a1	4:4:92	0.81	1.51	b1	4:4:92	0.66	1.21
a2	4:8:88	0.68	1.34	b2	4:8:88	0.73	1.32
a3	4:12:84	0.75	1.43	b3	4:12:84	1.02	1.53
a4	6:6:88	1.21	1.92	b4	6:6:88	1.00	1.67
a5	6:12:82	1.03	1.76	b5	6:12:82	1.07	1.69
a6	6:18:76	1.28	2.08	b6	6:18:76	1.05	1.67
a7	8:8:84	0.98	1.64	b7	8:8:84	1.08	1.65
a8	8:16:76	1.32	2.16	b8	8:16:76	0.85	1.44
a9	8:24:68	1.24	2.05	b9	8:24:68	0.84	1.41

红黏土,磷石膏在烘箱中以 50~80 ℃进行烘干,每 4 h 测一次含水率,直到磷石膏含水率基本不再变化为止。土样在烘箱中以 105~110 ℃烘干约 24 h,将磷石膏和土样分别碾碎后,均过 2 mm 筛,去除杂质,用四分法取出代表性样品备用。试样压实度取 90%,含水率为最优含水率,试样尺寸为 φ39.1×80 mm。根据表 7 的配合比,称取各组分的质量,将混合土在三轴击实器中分 3 层击实,各层接触面之间刨毛处理,将配置好的试样进行标准养护 7、28 d(温度 20±2 ℃,湿度大于等于 95%),养护完毕后进行疲劳动三轴试验。

2.4 无侧限抗压强度

对上述配合比磷石膏稳定土进行 7、28 d 非饱和土无侧限抗压强度试验,结果如表 8 所示。

根据《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)第 4.2.4 条,二级及以下公路底基层水泥稳定材料的 7 d 无侧限抗压强度必须大于等于 1 MPa。由表 8 可知,在满足强度要求的条件下,本着节约水泥和充分利用工业废料磷石膏的原则,选择 a6 组和 b3 组进行疲劳动力试验。

2.5 疲劳动力试验方案

为探究磷石膏稳定红黏土在长期循环荷载作用下的动力稳定性,将其与素红黏土进行对比分析,采用 9 组试样进行疲劳动三轴试验,分别定义为 A 组、B 组、C 组。本次试验设定固结比为 1.0,实际行

驶中列车荷载作用主要以低频振动为主,故振动频率设置为 5 Hz,动荷载选择正弦波荷载(图 1),动应力-应变(τ - γ)滞回曲线见图 2,其中 A_s 为滞回圈顶点至原点连线与横轴形成的直角三角形面积, γ_m 、 τ_m 分别为动应变和动应力幅值。由于路基填料深度围压一般在 20~60 kPa,属于低围压状态,本次围压分别取 30、40、50 kPa。终止某一级轴向动应力并施加下一级的条件为:①振动次数超过 10 000 而轴向动应变幅值仍非常小或接近于 0,且土样结构完好;②产生了明显的轴向动变形,但轴向动应变幅值随振动次数的增大趋于稳定且小于 10%,土样仍未完全失稳,故依此将振动次数设定为 10 000^[5-7]。此外,设定初始动应力幅值,当第一级动应力幅值试验结束后,A 组以 10 kPa 为增幅增大动应力,B 组和 C 组以 20 kPa 为增幅增大动应力,依次逐级增加,每一级增加后均振动 10 000 次然后进入下一级。疲劳动力试验配置方案见表 9。累积变形均通过 SDT-20 电脑数据采集仪自动采集,每完成设置振动次数后,自动将采集数据上传到 Letry 软件。

3 试验结果

3.1 累积变形曲线

累积变形试验结果如图 3~5 所示,其中 σ 为动应力水平。从图 3~5 可以看出,在不同试验条件下,素红黏土和磷石膏稳定土的累积变形曲线均明显地表现为稳定型、临界型和破坏型 3 种曲线。随围压和动应力水平的增加,累积变形随振动次数的增加整体上增大且向下扩展。动应力水平越大,累积塑性变形曲线变化越快,破坏时相应的振动次数越小。当围压由 30 kPa 增加到 50 kPa 时,破坏时累积变形变小,故增加围压和降低动应力水平可提高路基填料抵抗动力失稳状态的能力。

以围压为 30 kPa、固结比为 1.0、频率为 5 Hz

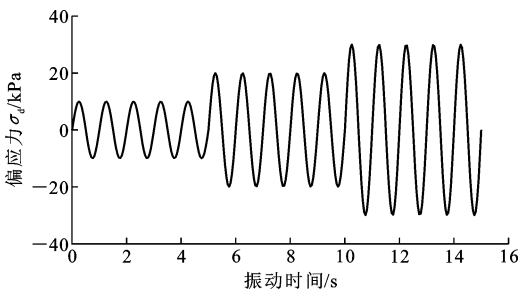


图 1 荷载波形
Fig. 1 Load waveform

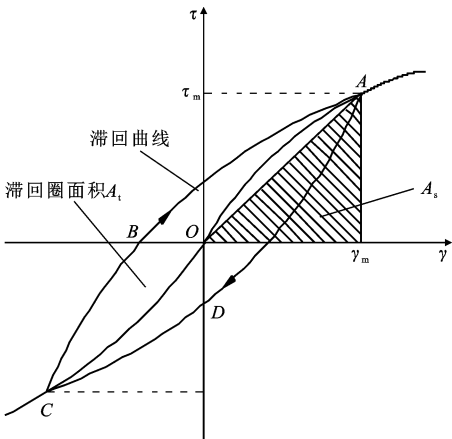


图 2 动应力-应变滞回曲线
Fig. 2 Dynamic stress-strain hysteresis curve

的石灰磷石膏稳定土试样的累积变形曲线为例,分析累积变形曲线的变化规律。

(1)在第 1 级、第 2 级和第 3 级动应力水平(动应力幅值分别为 19.82、37.63、61.28 kPa)下,当振动次数为 0~50 时,累积变形没有太大变化,近似一条水平线;当振动次数增加到 50~400 时,累积变形小幅度增加,此时几乎只产生弹性变形,处于稳定状态;当振动次数继续增大到 400~1 005 时,累积变形增速较慢,此时主要产生弹性变形,仅有少部分塑性变形,且累积的塑性应变较小,处于稳定状态,可

表 9 疲劳动力试验配置方案

Table 9 Fatigue dynamic test configuration scheme

编组	水泥(石灰)、磷石膏、红黏土配比	围压/kPa	振动频率/Hz	初始动应力幅值/kPa	动应力增幅/kPa
A-1(素土)	0 : 0 : 100	30	5	10	10
A-2(素土)	0 : 0 : 100	40	5	20	10
A-3(素土)	0 : 0 : 100	50	5	30	10
B-1(水泥)	4 : 12 : 84	30	5	20	20
B-2(水泥)	4 : 12 : 84	40	5	40	20
B-3(水泥)	4 : 12 : 84	50	5	60	20
C-1(石灰)	6 : 18 : 76	30	5	100	20
C-2(石灰)	6 : 18 : 76	40	5	120	20
C-3(石灰)	6 : 18 : 76	50	5	140	20

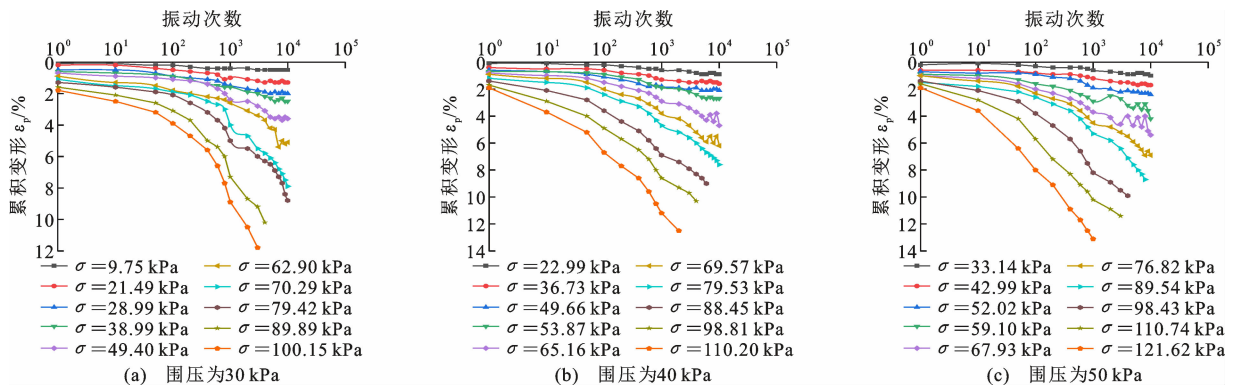


图 3 素红黏土在不同围压条件下的累积变形曲线

Fig. 3 Cumulative deformation curve of plain red clay under different confining pressure conditions

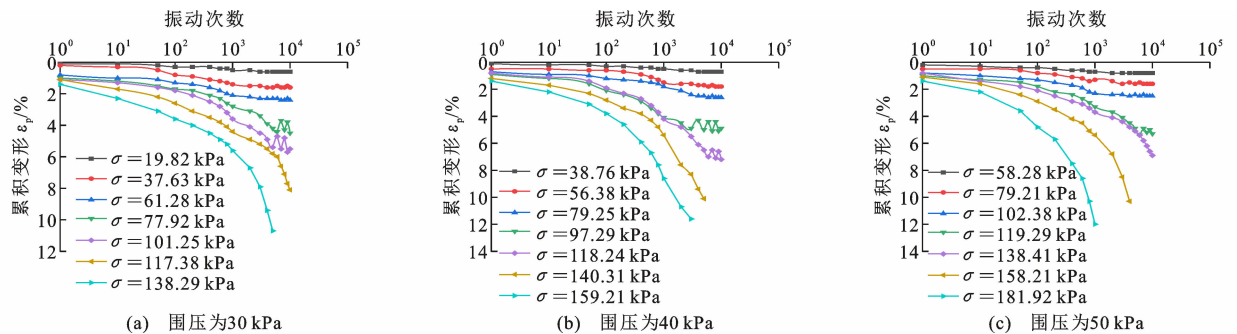


图 4 石灰磷石膏稳定土在不同围压条件下的累积变形曲线

Fig. 4 Cumulative deformation curve of lime phosphogypsum stabilized soil under different confining pressure conditions

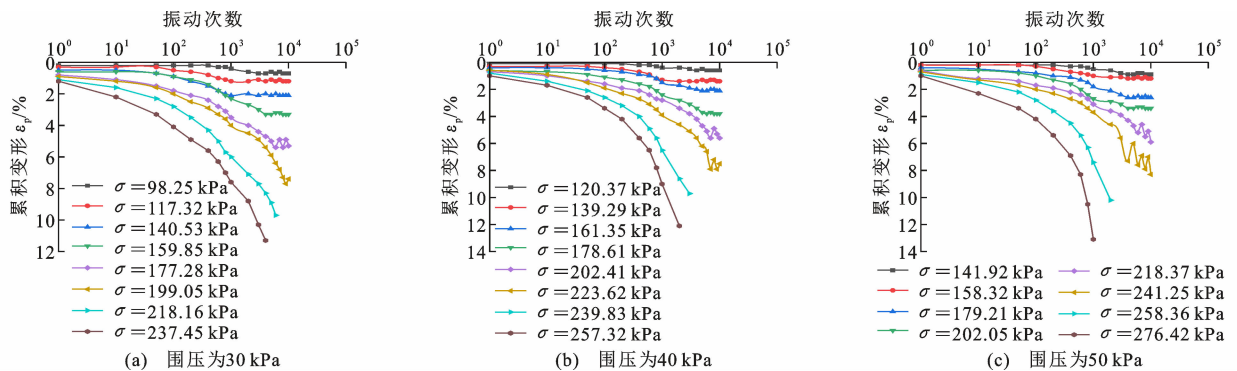


图 5 水泥磷石膏稳定土在不同围压条件下的累积变形曲线

Fig. 5 Cumulative deformation curve of cement phosphogypsum stabilized soil under different confining pressure conditions

判定该曲线为稳定型曲线。

(2)在第 4 级和第 5 级动应力水平(动应力幅值分别为 77.92、101.25 kPa)下,累积变形较为复杂,时大时小,处于波动状态,表现为临界状态,可判定该曲线为临界型曲线。

(3)在第 6 级和第 7 级动应力水平(动应力幅值分别为 117.38、138.29 kPa)下,当振次为 $1 \sim 1 \times 10^2$ 时,累积变形近似线性变化;当振次为 $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3$ 时,累积变形非线性增大;当振次为 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 时,累积变形继续大幅度地非线性增

大。在相同振次下,动应力水平越大,非线性特征越显著。在第 6 级动应力水平下,振次为 $2 \times 10^3 \sim 3 \times 10^3$ 时试样产生过大的累积塑性变形而发生破坏;在第 7 级动应力水平下,振次为 600~800 时试样发生破坏,可判定该曲线为破坏型曲线。在固结比为 1.0、频率为 5 Hz、围压为 40、50 kPa 条件下,石灰磷石膏稳定土试样的累积变形曲线规律类似。

根据图 3~5 的累积变形曲线结果,拟合素红黏土和磷石膏稳定土在围压 30、40、50 kPa 下的试验数据,稳定型曲线采用式(1)进行拟合,临界型曲线

采用式(2)进行拟合,破坏型曲线采用式(3)进行拟合。稳定型曲线和破坏型曲线的拟合效果较好,判定系数 R^2 大多数在 0.90 以上。临界型曲线数据波动较大,拟合适用性较差, R^2 在 0.54~0.90 之间。由于拟合数据众多,本文仅展示围压为 50 kPa 时的拟合结果,如表 10~12 所示。

$$\epsilon_p=\alpha N^\beta/(1+\gamma N^\beta)$$

（1）

$$\epsilon_p=a+bN$$

（2）

$$\epsilon_p=AN^B$$

（3）

式中: A 、 B 、 a 、 b 、 α 、 β 、 γ 为与动应力水平、土的性质等因素有关的拟合参数。

表 10 围压为 50 kPa 的素红黏土累积变形曲线拟合参数

Table 10 Cumulative deformation curve fitting parameters of plain red clay with confining pressure of 50 kPa

曲线类型	动应力幅值设定值/kPa	动应力幅值实测值/kPa	α 或 a 或 A	β 或 b 或 B	γ	R^2
稳定型	30	33.14	0.063 58	0.364 36	0.031 52	0.942 97
稳定型	40	42.99	0.314 88	0.070 47	0.013 91	0.964 48
稳定型	50	52.02	0.474 88	0.194 19	0.027 16	0.939 01
临界型	60	59.10	1.816 25	0.000 23		0.711 30
临界型	70	67.93	2.408 22	0.000 32		0.651 08
临界型	80	76.82	2.772 60	0.000 51		0.787 29
破坏型	90	89.54	0.822 90	0.260 43		0.988 65
破坏型	100	98.43	1.265 49	0.254 50		0.978 30
破坏型	110	110.74	2.039 72	0.224 41		0.967 35
破坏型	120	121.62	2.310 92	0.254 38		0.990 62

表 11 围压为 50 kPa 的石灰磷石膏稳定土累积变形曲线拟合参数

Table 11 Cumulative deformation curve fitting parameters of limestone phosphogypsum stabilized soil with confining pressure of 50 kPa

曲线类型	动应力幅值设定值/kPa	动应力幅值实测值/kPa	α 或 a 或 A	β 或 b 或 B	γ	R^2
稳定型	60	58.28	0.178 29	0.342 94	0.170 91	0.961 90
稳定型	80	79.21	0.346 30	0.296 51	0.143 77	0.943 22
稳定型	100	102.38	0.719 02	0.267 90	0.192 52	0.941 04
临界型	120	119.29	2.214 95	0.000 39		0.786 75
临界型	140	138.41	2.363 77	0.000 50		0.877 16
破坏型	160	158.21	0.526 07	0.348 11		0.970 10
破坏型	180	181.92	0.774 62	0.387 20		0.981 12

表 12 围压为 50 kPa 的水泥磷石膏稳定土累积变形曲线拟合参数

Table 12 Cumulative deformation curve fitting parameters of cement phosphogypsum stabilized soil with confining pressure of 50 kPa

曲线类型	动应力幅值设定值/kPa	动应力幅值实测值/kPa	α 或 a 或 A	β 或 b 或 B	γ	R^2
稳定型	140	141.92	0.031 69	0.433 61	0.014 80	0.910 94
稳定型	160	158.32	0.007 01	0.914 46	0.005 63	0.963 23
稳定型	180	179.21	0.143 52	0.431 49	0.033 52	0.962 81
稳定型	200	202.05	0.098 15	0.591 01	0.023 50	0.964 53
临界型	220	218.37	1.943 64	0.000 44		0.847 28
临界型	240	241.25	2.415 25	0.000 67		0.837 05
破坏型	260	258.36	0.357 97	0.435 80		0.982 30
破坏型	280	276.42	0.479 37	0.463 91		0.956 75

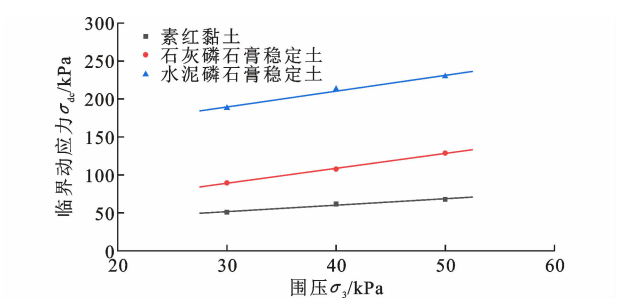


图 6 临界动应力均值与围压的关系

Fig. 6 Relationship between mean value of critical dynamic stress and confining pressure

根据图 6 结果,分别对素红黏土和磷石膏稳定土临界动应力与围压进行拟合,结果见表 14。从表 14 可以看出,素红黏土和磷石膏稳定土的临界动应

表 13 素红黏土和磷石膏稳定土的临界动应力设定值、试验值范围及均值

Table 13 Critical dynamic stress set value, test value range and mean value of plain red clay and phosphogypsum stabilized soil

编组	频率/Hz	围压/kPa	固结比	临界动应力设定值/kPa	临界动应力实测值/kPa	临界动应力均值/kPa
A-1	5	30	1	40~60	38.99~62.90	50.95
A-2	5	40	1	50~70	53.87~69.57	61.72
A-3	5	50	1	60~80	59.10~76.82	67.96
B-1	5	30	1	80~100	77.92~101.25	89.59
B-2	5	40	1	100~120	97.29~118.24	107.77
B-3	5	50	1	120~140	119.29~138.41	128.85
C-1	5	30	1	180~200	177.28~199.05	188.17
C-2	5	40	1	200~220	202.41~223.62	213.02
C-3	5	50	1	220~240	218.37~241.25	229.81

表 14 临界动应力均值与围压拟合结果

Table 14 Fitting results of critical dynamic stress mean value and confining pressure

试样	临界动应力均值与围压拟合公式	R ²
素红黏土	$\sigma_{dc} = 26.19 + 0.851\sigma_3$	0.953 810
石灰磷石膏稳定土	$\sigma_{dc} = 30.22 + 1.963\sigma_3$	0.999 637
水泥磷石膏稳定土	$\sigma_{dc} = 127.05 + 2.082\sigma_3$	0.975 330

表 15 素红黏土和磷石膏稳定土在动力破坏条件下的主应力 σ₁ 和围压 σ₃

Table 15 Principal stress σ₁ and confining pressure σ₃ of plain red clay and phosphogypsum stabilized soil under dynamic failure condition

编组	围压 σ ₃ /kPa	临界动应力均值/kPa	主应力 σ ₁ /kPa
A-1	30	50.95	80.95
A-2	40	61.72	101.72
A-3	50	67.96	117.96
B-1	30	89.59	119.59
B-2	40	107.77	147.77
B-3	50	128.85	178.85
C-1	30	188.17	218.17
C-2	40	213.02	253.02
C-3	50	229.81	279.81

力随围压的增大而线性增大,均可以用公式 $\sigma_{dc} = C + D\sigma_3$ 来表达(其中 C 、 D 为试验拟合参数)。

3.3 动强度

根据表 14 中动应力值得到动力破坏条件下的主应力 σ_1 ($\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{dc}$)和围压 σ_3 (表 15),再计算得到土的动内摩擦角 φ_d 、动黏聚力 c_d 和动抗剪强度 τ_d (表 16、17)。

由表 16、17 可知:石灰磷石膏稳定土和水泥磷石膏稳定土的动内摩擦角大于素红黏土;石灰磷石膏稳定土的动黏聚力略小于素红黏土,水泥磷石膏稳定土的动黏聚力大于素红黏土;石灰磷石膏稳定土和水泥磷石膏稳定土的动抗剪强度相比素红黏土有大幅提升,且水泥磷石膏稳定土的动抗剪强度增

表 16 土样在极限动平衡条件下的动强度指标

Table 16 Dynamic strength index of soil sample under limiting dynamic equilibrium condition

试样	动内摩擦角 φ _d /(°)	动黏聚力 c _d /kPa	动抗剪强度 τ _d /kPa
素红黏土	17.45	9.280	τ _d = 0.314σ _{dc} + 9.280
石灰磷石膏稳定土	29.71	8.730	τ _d = 0.571σ _{dc} + 8.730
水泥磷石膏稳定土	30.77	35.739	τ _d = 0.595σ _{dc} + 35.739

表 17 素红黏土和磷石膏稳定土动抗剪强度

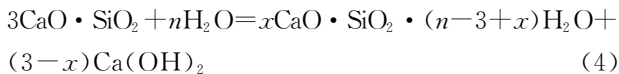
Table 17 Dynamic shear strength of plain red clay and phosphogypsum stabilized soil

编组	围压 σ ₃ /kPa	临界动应力均值/kPa	临界动抗剪强度 τ _d /kPa
A-1	30	50.95	25.518
A-2	40	61.72	28.900
A-3	50	67.96	30.859
B-1	30	89.59	59.906
B-2	40	107.77	70.287
B-3	50	128.85	82.323
C-1	30	188.17	147.921
C-2	40	213.02	162.707
C-3	50	229.81	172.697

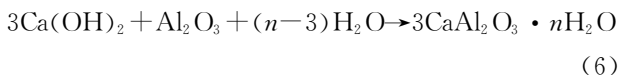
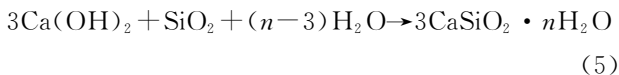
加幅度比石灰磷石膏稳定土更大。

4 改良机理

红黏土中加入水泥(石灰)再加水拌合后,水泥(石灰)首先遇水生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 随后 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会与红黏土中的活性氧化硅和活性氧化铝发生反应, 分别生成水化硅酸钙($3\text{Ca} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)和水化铝酸钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), 水化硅酸钙和水化铝酸钙具有胶结作用, 使土的强度提升, 其化学反应式为



随后氢氧化钙与土中的 SiO_2 、 Al_2O_3 发生反应, 其化学反应式为



水化铝酸钙并不是最后的生成物, 它将继续与磷石膏中的主要成分二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)进一步反应, 生成三硫型水化铝酸钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, 简称钙矾石), 其化学反应式为

$$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + (26-n)\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O} \quad (7)$$

钙矾石属三方晶系, 呈柱状结构, 其性质对磷石膏水泥改性土的性质有着很大的影响。水泥红黏土混合料中加入适量磷石膏可以激活混合料的活性, 加速水泥水化反应速度, 并参与反应形成一定量的细针状钙矾石。钙矾石相互交叉的针柱状晶体与水化硅酸钙一起形成空间网状结构, 填充大颗粒孔隙, 构成混合料骨架, 使孔径变小, 结构逐渐致密, 强度进一步提升。

5 结 语

(1) 动应力水平越大, 累积变形曲线变化幅度越大, 试样破坏时振次越小。增加围压和降低动应力水平可提高路基填料抵抗动力失稳状态的能力。

(2) 在不同试验条件下, 素红黏土和磷石膏稳定土的累积变形曲线均明显地表现为稳定型、临界型和破坏型 3 种曲线, 稳定型曲线、临界型曲线和破坏型曲线可分别采用公式 $\epsilon_p = \alpha N^B / (1 + \gamma N^B)$ 、 $\epsilon_p = a + bN$ 和 $\epsilon_p = AN^B$ 进行拟合, 稳定型曲线与破坏型曲线拟合效果较好, 临界型曲线拟合效果不太理想。

(3) 素红黏土和磷石膏稳定土临界动应力随围

压的增大而线性增大, 均可以用 $\sigma_{dc} = C + D\sigma_3$ 来表示。

(4) 石灰磷石膏稳定土和水泥磷石膏稳定土动抗剪强度相比素红黏土有大幅提升, 且水泥磷石膏稳定土的动抗剪强度增加值比石灰磷石膏稳定土更大。

(5) 磷石膏稳定土强度提升是由水泥(石灰)和磷石膏的共同作用引起的, 水泥(石灰)反应生成水化硅酸钙(C—S—H 凝胶), 磷石膏反应生成钙矾石 AFt, 两者相互交织形成空间网状结构。

参考文献:

References:

- [1] 魏 密, 杨 群, 郭忠印. 安定理论在柔性路面设计中的应用[J]. 公路交通技术, 2007, 23(1): 5-9.
WEI Mi, YANG Qun, GUO Zhongyin. Application of shakedown theory in flexible pavement design [J]. Technology of Highway and Transport, 2007, 23(1): 5-9.
- [2] STEWART H E. Permanent strains from cyclic variable-amplitude loadings [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(6): 646-660.
- [3] 穆 锐. 贵阳地区红黏土动力特性及其动本构关系研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
MU Rui. Study on dynamic constitutive relationship and dynamic characteristics of red clay in Guiyang area [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [4] 刘晓红. 高速铁路无砟轨道红黏土路基动力稳定性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
LIU Xiaohong. Study on dynamic stability of red clay subgrade in ballastless track of high-speed railway [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [5] 余 周. 循环荷载作用下饱和粉质黏土动力特性的试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
YU Zhou. Experimental study on dynamic characteristics of saturated silty clay under cyclic loading [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [6] 蔡 英, 曹新文. 重复加载下路基填土的临界动应力和永久变形初探[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(1): 1-5.
CAI Ying, CAO Xinwen. Study of the critical dynamic stress and permanent strain of the subgrade-soil under the repeated load [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31(1): 1-5.
- [7] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading [J]. Transportation Research

- Record, 1975(537): 1-17.
- [8] SEED H, CHAN C, MONISMITH C. Effects of repeated loading on the strength and deformation of compacted clay[J]. Highway Research Board Proceedings, 1955, 34: 541-558.
- [9] SEED H B. Soil strength during earthquakes[C]// MUTO K. Proceeding of the Second World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo: Gakujutsu Bunkai Fukyu-kai, 1960: 183-194.
- [10] THIERS G R, SEED H B. Cyclic stress-strain characteristics of clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(2): 555-569.
- [11] SANGREY D A, HENKEL D J, ESRIG M I. The effective stress response of a saturated clay soil to repeated loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1969, 6(3): 241-252.
- [12] 彭社琴, 赵其华, 黄润秋. 成都粘土动三轴试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(1): 57-60.
- PENG Sheqin, ZHAO Qihua, HUANG Runqiu. The dynamic triaxial test study of Chengdu-clay[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002, 13(1): 57-60.
- [13] 商拥辉, 尹方芳, 徐林荣, 等. 重载铁路水泥改良膨胀土路基动力特性数值研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(10): 18-23.
- SHANG Yonghui, YIN Fangfang, XU Linrong, et al. Numerical research on the dynamic features of cement-stabilized expansive soil subgrade of heavy haul railway[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(10): 18-23.
- [14] 胡 萍, 王永和, 卿启湘. 改良土填筑过渡段基床底层的动力特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(6): 1705-1711.
- HU Ping, WANG Yonghe, QING Qixiang. Dynamic performance of bridge approach subgrade with improved soil as base course[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(6): 1705-1711.
- [15] 贵州省红粘土和高液限土路基设计与施工技术规范: DB52/T 1041—2015[S]. 贵阳: 贵州省质量技术监督局, 2015.
- Technical specifications for design and construction of red clay or high liquid limit soil subgrade in Guizhou province: DB52/T 1041—2015[S]. Guiyang: Guizhou Bureau of Quality and Technical Supervision, 2015.
- [16] 王康宇, 庄 妍, 耿雪玉. 铁路路基粗粒土填料临界动应力试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1865-1873.
- WANG Kangyu, ZHUANG Yan, GENG Xueyu. Experimental study on critical dynamic stress of coarse-grained soil in railway subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 1865-1873.
- [17] 蒋 洪, 蒋 浩, 陈开圣, 等. 江西省红粘土公路边坡病害调查[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2019, 36(6): 109-113.
- JIANG Hong, JIANG Hao, CHEN Kaisheng, et al. Investigation of red clay highway's slope damages in Jiangxi Province[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2019, 36(6): 109-113.
- [18] 朱 旭, 田 林, 罗军尧. 昆明某工程区不同埋深下红土的物理特性研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 100-104.
- ZHU Xu, TIAN Lin, LUO Junyao. Physical properties of laterite and engineering stability evaluation in an engineering area of Kunming [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2022, 39(1): 100-104.
- [19] 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.
- LIAO Ruobo, XU Xiaoyan, JI Luojun, et al. Situation and prospects of China's the phosphogypsum resources applications[J]. Sulphuric Acid Industry, 2012(3): 1-7.
- [20] MOTZ H, GEISELER J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources[J]. Waste Management, 2001, 21(3): 285-293.
- [21] 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.
- WA Hao. Study on the application of phosphorus slag (phosphogypsum) pavement base material [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.
- [22] 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Technical guidelines for construction of highway roadbases: JTG/T F20—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [23] AHMED K. Effect of gypsum on the hydro-mechanical characteristics of partially saturated sandy soil [D]. Cardiff: Cardiff University, 2013.
- [24] 徐雪源, 徐玉中, 陈桂松, 等. 磷石膏-粉煤灰-石灰-粘土混合料的干缩试验研究[J]. 中南公路工程, 2006, 31(4): 113-114, 119.
- XU Xueyuan, XU Yuzhong, CHEN Guisong, et al. Testing study on the dry shrinkage property of mixtures of phosphogypsum-fly ash-lime-clay[J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2006, 31(4):

113-114,119.

[25]

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.

XU Xueyuan, Study on engineering characteristics of phosphogypsum and its mixture[D]. Nanjing: Hohai University,2005.

[26]

徐雪源,徐玉中,陈桂松,等. 工业废料磷石膏的工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(12):2096-2099.

XU Xueyuan, XU Yuzhong, CHEN Guisong, et al. Testing study on engineering characteristics of phosphogypsum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(12):2096-2099.

[27]

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.

TAO Song. Study on the performance of industrial waste phosphogypsum as road filler [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2012.

[28]

公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2021.

Test methods of soils for highway engineering:JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications Press,2021.

[29]

公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S]. 北京:人民交通出版社,2009.

Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering:JTG E51—2009[S]. Beijing:China Communications Press,2009.