

文章编号:1007-9629(2022)01-0081-08

改良磷石膏的路用性能

孟维正^{1,2}, 蒋关鲁^{1,2,*}, 袁德昭^{1,2}, 鲍晶晶^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:对改良磷石膏进行了击实试验、无侧限抗压强度试验和加州承载比试验. 然后通过离心机模拟了不同压实度和填土高度的路基(某方案改良的磷石膏作为路基填料)的沉降情况, 并通过室内压缩试验结合分层总和法计算路基顶面的最终沉降. 最后得出满足路基强度要求的改良磷石膏最佳配合比为: 半水石膏占风干磷石膏质量 10%, 液黏剂占风干磷石膏质量 0.5%、85%、95%、100% 压实度的填土高度不大于 20 m 的路堤可满足 20 cm 的沉降要求.

关键词:道路工程; 改良磷石膏; 室内土工试验; 离心机试验

中图分类号: U414.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.01.012

Road Performance of Modified Phosphogypsum

MENG Weizheng^{1,2}, JIANG Guanlu^{1,2,*}, YUAN Dezhaoyang^{1,2}, BAO Jingjing^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Chengdu 610031, China)

Abstract: Compaction test, unconfined compressive strength test and California bearing ratio test were conducted to modified phosphogypsum. The settlement of roadbed with different compaction degree and height (modified phosphogypsum system as roadbed filler) was simulated by geotechnical centrifuge. The final settlement of subgrade with different boundary conditions was obtained by compression test and layer-summation method. The optimum mix ratio after comprehensive consideration is semi-hydrated gypsum accounts for 10% of the mass of air-dried phosphogypsum, liquid adhesive accounts for 0.5%. The modified phosphogypsum satisfies strength requirement of roadbed. Embankment (20 m height and below) with a compaction degree of 85%, 95% and 100% satisfies the post-construction settlement requirements of 20 cm.

Key words: road engineering; modified phosphogypsum; laboratory soil test; centrifuge test

磷石膏是生产磷复肥时产生的固体废弃物, 不仅占用土地地面资源, 起风时也会增加空气中细颗粒物含量, 危害人体健康. 截至 2017 年底, 中国磷石膏堆积量已达到 5 亿 t, 全国年产量约为 0.75 亿 t, 磷石膏的年产量远超年利用量^[1], 磷石膏的处理已迫在眉睫. 国内外主要将工业废料磷石膏应用于水泥原料、缓凝剂、农作物肥料、建材原料 4 个方面^[1-2], 但利

用量远远无法跟上产出量的增长速度. 若能将其作为路基路面填料, 可以在很大程度上解决磷石膏堆积问题.

国内对磷石膏的工程性能曾进行过一些初步研究. 徐雪源等^[3-5]通过静三轴试验、动三轴试验、压缩试验、渗透试验研究了磷石膏的工程特性, 但未针对磷石膏饱水软化的性质提出改良方案. 荀勇^[6]论证了

收稿日期: 2020-09-09; 修订日期: 2021-10-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0303603-4); 国家自然科学基金资助项目 (51878577)

第一作者: 孟维正 (1992—), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 西南交通大学博士生. 主要研究方向为路基工程、岩土工程. E-mail: 332157773@qq.com

通讯作者: 蒋关鲁 (1962—), 男, 浙江杭州人, 西南交通大学教授, 博士生导师, 博士. 主要研究方向为土动力学及路基动力学基础理论等.

E-mail: wgljiang@swjtu.edu.cn

将磷石膏和粉煤灰掺入水泥中用于加固软土.董满生等^[7]证明了磷石膏可作为掺加物改良路面半刚性基层性能,但两者磷石膏消耗量极少,几乎不能解决磷石膏堆积问题.查进等^[8]在贵阳市将磷渣与碎石以一定比例混合后作为试验段基层填料,证明了磷渣作为路用材料的可行性,但其击实试验所得数据(最佳含水率为5.5%,最大干密度为2.06 g/cm³)与德阳市磷石膏击实性能有巨大的差异,且并未给出磷石膏水稳定性改良方案.李章锋^[9]通过无侧限抗压强度(UCS)试验、加州承载比(CBR)试验和室内动态模型,证明磷石膏经过改良后强度可满足路基填料的要求,但该方案不够完善,无法进行不同等级公路填料的比选.

工业废料磷石膏粒径分布范围与粉土吻合,但其含水率较高,水稳定性较差,很难进行工程应用.故本文在已有研究基础上,采用针对德阳市磷石膏研发的2种改善水稳定性的液黏剂(还原剂和液黏剂

等相结合),对掺加少量水泥、生石灰,半水石膏的工业废料磷石膏进行击实试验、UCS试验、CBR试验、压缩试验、离心机试验;并提出解决磷石膏堆积难题的方案.

1 试验

1.1 原材料

磷石膏取自德阳市工业废料磷石膏,呈深灰色,风干之后呈灰白色,粒径在0.05~0.35 mm之间,呈正态分布,属于粉土,pH值在3.5~4.1之间,含水率¹⁾高达24%.磷石膏是复杂的多组分结晶体,主要有针状晶体、板状晶体和密实晶体,其晶体粗大,表面覆盖可溶磷、有机物等杂质.磷石膏的主要化学组成见表1.

研究所用改良工业废料磷石膏的掺加物有:I型液黏剂(A)、II型液黏剂(A')、M32.5砌筑水泥(C)、生石灰(L)、 β 型半水石膏(G).液黏剂成分配合比见专利^[10].

表1 工业废料磷石膏主要化学组成

Table 1 Main chemical composition of industrial waste phosphogypsum

									w/%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O
19.680	6.440	1.140	36.470	7.153	0.012	0.035	28.930	0.105	0.035

1.2 试验方案及方法

各改良磷石膏试件配合比见表2.配合比以各掺加物占风干磷石膏的质量分数计.同时,制备无掺加物的磷石膏试件作为对照组(P).

参照JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中T 0804—1994方法进行击实试验,选择重型击实和干土法,仅对试件P、A3、AC1、ACL6、A'G4进行击实试验.根据JTG E51—2009规程中T 0843—2009、T 0845—2009方法来确定磷石膏及改良磷石膏的最佳含水率和最大干密度.

无侧限抗压强度试验参照JTG E51—2009规程中T 0805—1994方法进行,试件采用静压法制作,为直径5 cm、高5 cm、体积98.2 cm³的圆柱体试件.每组制作14个试件,其中7个试件在标准条件((20±2)℃,相对湿度95%以上)下养护6 d,再在饱水条件((20±2)℃,试件浸泡于水中)下养护1 d;另外7个试件在标准条件下养护7 d.对养护至7 d后的各试件进行UCS试验,得到饱水养护试件的无侧限抗压强度UCS'和标准养护试件无侧限抗压强度UCS.水稳定性系数K取UCS'与UCS的比值,结果均列

于表2.

为研究养护龄期对无侧限抗压强度的影响,对ACL3组的7个试件在标准养护7、14、21、28 d后进行无侧限抗压强度试验;另外7个试件在标准养护6、13、20、27 d后饱水养护1 d,再进行无侧限抗压强度试验.

参照JTG E40—2007《公路土工试验规程》中T 0134—1993方法,对试件A'G5、A'G6(掺加不同比例的II型液黏剂与石膏组)与P(无掺加物的磷石膏),进行90%、95%、98%压实度下的CBR试验.

为了定量地模拟改良磷石膏路基竣工后5 a内不同压实度和不同填土高度下路基顶面沉降量,进行离心机试验.设计压实度85%、95%、100%,填土高度4、8、12、16、20 m的15组土样.试验采用西南交通大学土工离心机实验室TLJ-2型离心机,离心加速度为100g,干密度比例尺为1:1,土样压实度由干密度控制,因此压实度比例尺也为1:1,几何比例尺为1:100,以2 cm作为1个单位厚度(环刀高度),先用静压法制作高度为2 cm的土样,然后将环刀和其中的土样叠起来以达到各土样厚度,最后放入离心模型

1)文中涉及的含量、组成等均为质量分数.

表2 改良磷石膏试件配合比、无侧限抗压强度和水稳定性
 Table 2 Mix proportion, unconfined compression strength and water stability of modified phosphogypsum specimens

Group	Specimen	Mix proportion(by mass)/%					UCS/kPa	UCS'/kPa	K/%
		A	A'	C	L	G			
A	A1	2.0	0	0	0	0	248.89	0	0
	A2	4.0	0	0	0	0	282.66	0	0
	A3	6.0	0	0	0	0	312.54	0	0
	A4	8.0	0	0	0	0	460.91	304.49	66.06
A'	A'1	0	3.00	0	0	0	415.22	0	0
	A'2	0	4.00	0	0	0	434.39	0	0
	A'3	0	5.00	0	0	0	535.44	0	0
	A'4	0	6.00	0	0	0	688.62	595.56	86.49
AC	AC1	2.0	0	3.0	0	0	628.57	534.73	85.07
	AC2	4.0	0	3.0	0	0	700.97	580.83	82.86
	AC3	6.0	0	3.0	0	0	824.25	690.37	83.76
ACL	ACL1	0.1	0	0.5	0.5	0	347.74	0	0
	ACL2	0.2	0	1.0	1.0	0	482.22	0	0
	ACL3	0.3	0	1.5	1.5	0	913.50	765.95	83.85
	ACL4	0.5	0	2.5	2.5	0	1 768.49	1 644.61	93.00
	ACL5	0.7	0	3.5	3.5	0	1 489.98	1 395.56	94.66
	ACL6	0.9	0	4.5	4.5	0	1 401.54	1 326.45	94.64
ACL'	ACL'1	0.2	0	1.0	1.0	0	554.29	0	0
	ACL'2	0.3	0	2.0	1.0	0	917.60	0	0
	ACL'3	0.4	0	3.0	1.0	0	1 098.72	961.31	87.49
	ACL'4	0.5	0	4.0	1.0	0	1 261.15	1 168.78	92.68
	ACL'5	0.6	0	5.0	1.0	0	1 346.56	1 138.69	84.56
	ACL'6	0.7	0	6.0	1.0	0	1 534.50	1 373.13	89.48
AGL	AGL1	0.5	0	0	1.0	4	540.05	0	0
	AGL2	0.7	0	0	1.0	6	599.68	0	0
	AGL3	0.9	0	0	1.0	8	656.96	520.52	79.23
A'G	A'G1	0	0.25	0	0	5	581.40	0	0
	A'G2	0	0.50	0	0	5	681.39	0	0
	A'G3	0	0.75	0	0	5	730.50	572.50	78.37
	A'G4	0	0.25	0	0	10	733.08	0	0
	A'G5	0	0.50	0	0	10	698.46	492.37	70.49
	A'G6	0	0.75	0	0	10	650.25	493.31	75.86

架的土样筒中.离心模型架见图1,顶板和底板均为钢板(高刚度可排除试验过程中板体变形误差)离心模型架共18个筒,由于试验设备所限,只使用了15个筒(每个筒为不同的填土高度和压实度).本试验采用HG-C1400型和HG-C1200型2种激光位移计,传感器支架固定在顶板上,可通过支架来调节桶内激

光传感器高度.由固结参数的时间比例尺可知模拟路基5a的沉降只需4.3h.

为了通过分层总和法计算土样在自重作用下的总沉降,参照JTGE40—2007规程中T0137—1993单轴固结仪法,对85%、95%、100%压实度的土样进行单轴压缩试验,测定其压缩模量 E_s .

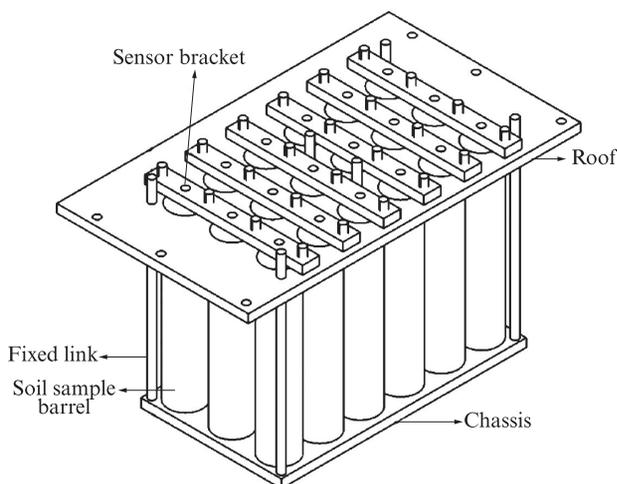


图1 离心模型架
Fig. 1 Centrifuge model bracket

2 土工试验结果及讨论

2.1 最佳含水率及最大干密度

试件P、A3、AC1、ACL6、A'G4的击实曲线如图2所示。由图2可见,最佳含水率平均值14.91%,最大干密度平均值 1.61 g/cm^3 。5组改良方案掺加物质量最大的是A'G4,其最大干密度和最佳含水率并未见明显变化。

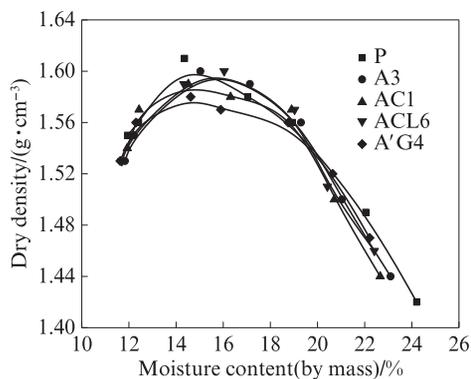


图2 试件P、A3、AC1、ACL6、A'G4的击实曲线
Fig. 2 Compaction curves of specimen P, A3, AC1, ACL6, A'G4

2.2 无侧限抗压强度

各改良磷石膏试件的无侧限抗压强度测试结果列于表2,由表2可见:当2种液黏剂单掺的掺量较少时,饱水试件不具有强度,标准养护试件无侧限抗压强度与液黏剂掺量成正比。由单掺液黏剂的A、A'组对比可知,II型液黏剂较I型液黏剂对磷石膏的改良效果更好。由A与AC组对比可知饱水试件仍具有较高强度,说明复掺效果优于单掺,水泥可以提高磷石膏的无侧限抗压强度。

由表2中I型液黏剂与水泥、生石灰以不同比例复掺时AC、ACL、ACL'组的UCS试验结果可见:当水泥、生石灰以等质量掺加时ACL组较主掺水泥的ACL'组效果更好,当生石灰掺量增加到2.50%时(水泥、生石灰总掺量5.00%),UCS到达峰值,说明存在水泥、生石灰复掺最佳配合比。在水泥、生石灰总掺量为7.00%时,ACL与ACL'组的UCS相差很小,说明水泥和生石灰复掺的比例决定了磷石膏改良后强度的变化趋势,水泥和生石灰总掺量决定了不同改良方案下的强度增量。

由表2中I型液黏剂与半水石膏、生石灰复掺时AGL组、I型液黏剂与不同比例水泥、生石灰复掺时ACL、ACL'组的UCS试验结果可知:在掺加等质量生石灰的情况下,额外掺加水泥的试件UCS要高于额外掺加半水石膏的试件;此外,由UCS'数据对比可知,掺加水泥的试件水稳定性改良效果优于掺加半水石膏的试件,说明生石灰与水泥复掺效果要优于生石灰与半水石膏复掺效果;不等质量复掺水泥、生石灰的改良效果也要优于半水石膏、生石灰的改良效果。

水泥先通过硅酸盐和铝酸盐水化形成水泥浆,然后水泥浆中的 Ca^{2+} 与土体中金属离子发生离子置换,形成水泥土,凝结为空间网络,空间网络逐渐变密硬化,最后 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生碳化反应,强度提高^[11]。生石灰是先通过 CaO 水化, Ca^{2+} 与土体低价阳离子发生置换导致分子引力增大,形成小土团,接着发生火山灰反应,土体密实度、强度水稳定性都有所提高,最后熟石灰碳化致使土体强度增强。水泥、生石灰双掺时,水泥中 SiO_2 、 Al_2O_3 与生石灰充分发生火山灰反应,较单掺时强度更高,因此表2中的ACL组与ACL'组UCS要高于AC组。生石灰在掺量较低时,主要起稳定作用,降低土体的塑性和亲水性,增强水稳定性。水泥、生石灰掺量超过某个界限后,水泥已不需要过多的生石灰参与火山灰反应,部分生石灰残留在土体孔隙中,导致改良土体强度不再增长甚至降低。

由表2中II型液黏剂与半水石膏复掺时A'G组的UCS试验结果可知:未饱水时,半水石膏掺量10%的试件UCS略大于半水石膏掺量5%的试件;饱水时,半水石膏掺量10%的试件在液黏剂掺量为0.50%时即具有强度,而半水石膏掺量5%的试件在液黏剂掺量为0.75%时才具有强度。说明II型液黏剂及半水石膏复合掺量对工业废料磷石膏强度提高较小,对水稳定性提高较大。

2.3 龄期与无侧限抗压强度的关系

试件 ACL3 在不同龄期下的无侧限抗压强度见图 3。由图 3 可见:试件 ACL3 无侧限抗压强度随龄期增长而增大;标准养护试件的无侧限抗压强度 UCS 较饱水养护试件的无侧限抗压强度 UCS' 增长更快。这是由于饱水养护下水泥已经充分水化,标准养护下水泥接触水分条件有限,未能完全水化,随龄期延长,逐渐完成水化凝结硬化。

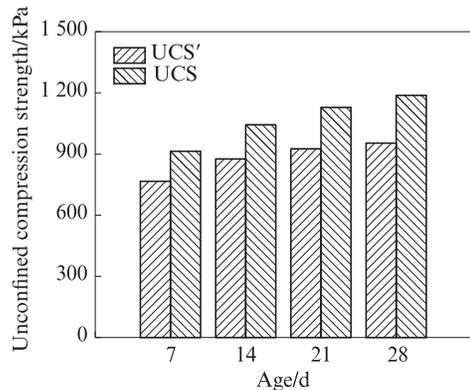


图3 试件 ACL3 在不同龄期下的无侧限抗压强度
Fig. 3 Unconfined compression strength of specimen ACL3 at different ages

2.4 水稳定性

各改良磷石膏试件的水稳定性系数 K 见表 2 所示。由表 2 可知:Ⅱ型液黏剂比Ⅰ型液黏剂对磷石膏的水稳定性改良效果更好;掺加Ⅰ型液黏剂的改良磷石膏 ACL 中,水泥与生石灰等比例掺加且两者掺量均为 2.5% 时,改良磷石膏水稳定性最好,其饱水养护试件的无侧限抗压强度高于标准养护试件;复掺水泥与生石灰改良磷石膏 ACL 和 ACL' 的水稳定性优于复掺生石灰与半水石膏改良磷石膏 AGL。

复掺水泥与生石灰改良磷石膏水稳定性较好的原因为:水泥与生石灰发生结晶硬化,与磷石膏形成共晶体,导致试件溶解度降低;火山灰作用的胶凝物在微小磷石膏团外围形成保护膜,减少了试件透水性;碳化作用形成的 CaCO_3 等盐类对磷石膏颗粒起胶结作用,试件整体性加强。以上 3 种作用共同提高了改良磷石膏的水稳定性。

2.5 CBR 试验

90%、95%、98% 压实度下试件 A'G5、A'G6 和 P 的 CBR 试验结果见表 3。其中试件 P 在 CBR 试验预压阶段已达 2.5 mm 位移,其加州承载比 $\text{CBR}=0\%$ 。由表 3 可知:改良磷石膏试件 A'G5、A'G6 的 CBR 随着压实度的增大而增大,这是因为压实度增大减小了土粒间空隙,土粒嵌合更紧密,提高了抗剪强度;

半水石膏掺量均为 10% 时,增加Ⅱ型液黏剂掺量对 CBR 影响不大;3 种试件吸水量均随着压实度的增大而降低,这是因为压实度增大减小了土粒间空隙,试件渗透性降低,击实试验排出的自由水无法得到补充,因此试件吸水量降低。

CBR 试验饱水 4 d 膨胀量结果见表 3。由表 3 可见,试件 A'G5 在 90% 压实度下膨胀量最大,为 0.60 mm,与陈善雄等^[12]研究的中、弱膨胀土 CBR 膨胀量试验对比,可将试件 A'G5、A'G6 和 P 视为非膨胀土或弱膨胀土;添加半水石膏和液黏剂后,膨胀量几乎不变,可见半水石膏和液黏剂对磷石膏膨胀性的影响极小;同种试件膨胀量随着压实度的增高基本呈降低趋势,这是由于压实度增高,试件渗透性降低,内部补充的自由水减少所致。

表3 CBR 试验结果
Table 3 Test results of CBR

Specimen	Degree of compaction/%	CBR/%	Water absorption/g	Swell capacity (4 d)/mm
A'G5	90	18.73	286.67	0.60
	95	28.20	186.67	0.10
	98	35.57	130.00	0.17
A'G6	90	20.54	283.33	0.47
	95	25.60	196.67	0.18
	98	41.67	106.67	0.09
P	90	0	176.67	0.26
	95	0	113.33	0.25
	98	0	40.00	0.14

2.6 UCS 和 CBR 试验结论

综上所述:改良磷石膏 A'4、AGL3、A'G3、A'L、A'G、A'GL1、A'GL2 可以满足 JTGT F20—2015《公路路面基层施工技术细则》石灰稳定土对二级及二级以下公路在路面基层及底基层的无侧限抗压强度要求 (500~700 kPa);改良磷石膏 ACL4、ACL5、ACL6、ACL'4、ACL'5、ACL'6 可以满足 JTGT F20—2015 细则对水泥稳定土二级及二级以下公路在路面底基层的无侧限抗压强度要求 (1 000~3 000 kPa)。JTG D30—2015《公路路基设计规范》中,高速公路、一级公路对路床 CBR 最小值的要求为 8%,改良磷石膏 A'G5、A'G6 的 CBR 值均高于规范要求,可以作为各等级公路的路床;高速公路、一级公路对路堤 CBR 最小值的要求为 4%,改良磷石膏 A'G5、A'G6 也可满足此要求。因此,对水稳定性要求较高的地区(南方)或强度要求较高的地区,推荐采用改良磷石膏 ACL4、ACL5、ACL6、ACL'4、ACL'5、ACL'6 的配

合比;对水稳定性和强度要求较低的地区推荐采用改良磷石膏A'G5、A'G6的配合比.在满足路基路面强度要求的前提下,考虑经济性因素后,选择性价比较高的改良磷石膏A'G5来进行后续压缩试验和离心机试验.

3 压缩试验及离心机试验

对离心试验所得不同压实度、不同填土高度土样由于自重产生的沉降量数据进行整理并作几何比例尺转换,得到沉降量-时间($S-t$)曲线,见图4~6.在竣工初期, $S-t$ 曲线斜率较大,此阶段沉降占最终沉降比例也很大,说明竣工初期,路基沉降速度较快,填土的固结并未彻底结束,在中期,路基沉降速度明显放缓,说明此时路基固结基本完成,开始进入次固结阶段,路基沉降的原因以土的蠕变为主.路基填土高度越高,最终沉降越大,固结期也越长.对比图4~6可知,相同填土高度下,压实度越低的填土,残余形变越大,固结期也越长.

改良磷石膏A'G5的压缩模量结果见表4.最终沉降采用分层总和法来计算,具体步骤如下:(1)将

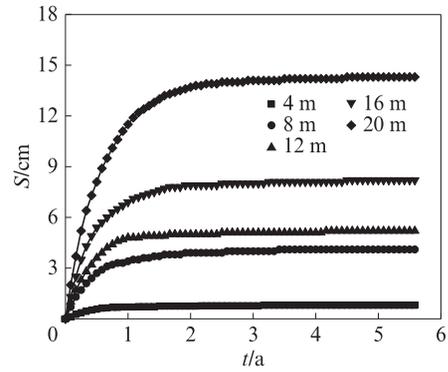


图6 100%压实度下路基顶面 $S-t$ 曲线
Fig. 6 $S-t$ curves of subgrade under 100% degree of compaction

路基由顶至底进行分层,第1层和第2层为1 m厚(离心模型半个环刀高),以下各层均为2 m厚(离心模型一个环刀高);(2)压缩模量计算:最顶层质量较小,不考虑其自重沉降,其余各层均以该层上覆质量与压缩试验所得 E_s 之比作为该层压缩模量,不同填土高度土层的 E_s 由压缩试验所得结果(表4)内插可得;(3)沉降量计算:第1层由于没有上覆质量故沉降量极小,忽略不计,将其余各层沉降量累加,得到各压实度、各填土高度下的路基顶面最终沉降,结果见图7~9.由图7~9可拟合得到不同压实度、不同填土高度下路基顶面沉降的时程公式,以便得到工后不同时刻

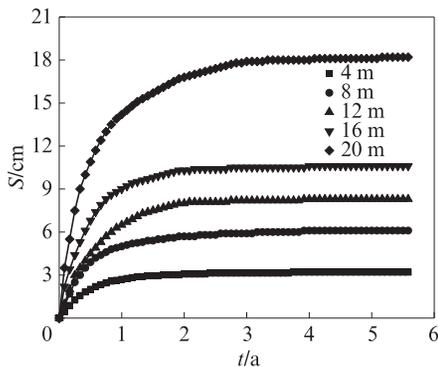


图4 85%压实度下路基顶面 $S-t$ 曲线
Fig. 4 $S-t$ curves of subgrade under 85% degree of compaction

表4 改良磷石膏A'G5的压缩模量 E_s
Table 4 E_s of modified phosphogypsum A'G5

Pressure/kPa	Degree of compaction/%		
	85	95	100
50	2.51	9.45	12.01
100	10.70	11.81	14.95
200	16.18	17.72	20.34
400	24.53	25.44	31.89

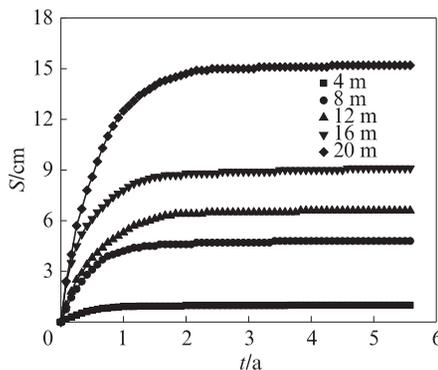


图5 95%压实度下路基顶面 $S-t$ 曲线
Fig. 5 $S-t$ curves of subgrade under 95% degree of compaction

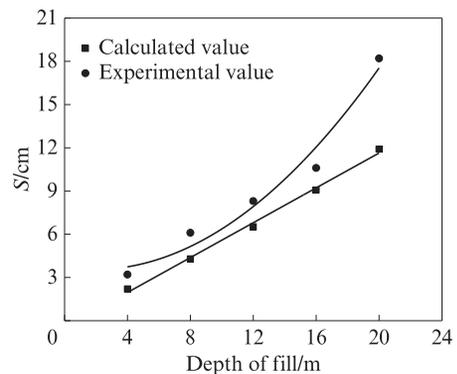


图7 85%压实度路基顶面最终沉降
Fig. 7 Final settlement of subgrade under 85% degree of compaction

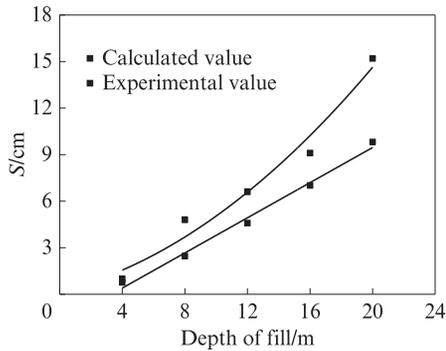


图8 95%压实度路基顶面最终沉降

Fig. 8 Final settlement of subgrade under 95% degree of compaction

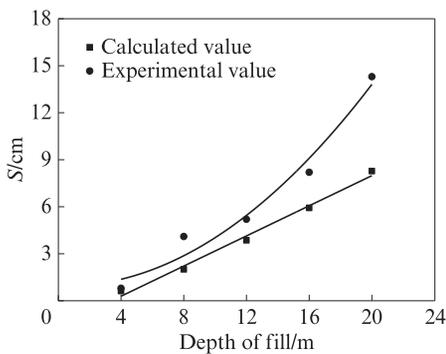


图9 100%压实度路基顶面最终沉降

Fig. 9 Final settlement of subgrade under 100% degree of compaction

的路基顶面沉降值并进行定量分析.由于篇幅所限,拟合公式不在此给出.

将离心机试验结果与分层总和法计算结果进行对比,可知试验结果与计算结果较为接近,数据可靠性较高.但由于分层总和法计算时忽略了路基最顶层的自重沉降,因此其相对于离心试验结果存在一定差值.粉土等一般路基容许工后沉降在公路路基设计规范中并未给出,参考DG/TJ 08-2237—2017《道路路基设计规范》:高速公路、一级公路、城市快速路、城市主干路工后沉降要求不大于20 cm,其他道路工后沉降要求不大于30 cm.85%、95%、100%压实度的20 m及以下高度的路堤均可满足20 cm的工后沉降要求.

4 结论

(1)工业废料磷石膏直接用于路基路面填料无法满足水稳定性要求,掺加液黏剂等可以改善其水稳定性.当水泥与生石灰等比例掺加时,试件水稳定性最好.随龄期延长,改良磷石膏未饱水时强度增长较饱水时更快.改良磷石膏吸水量随着压实度的增大而降低.

(2)水泥与生石灰以等质量掺加较主掺水泥效果更好,生石灰增加到风干磷石膏质量的2.5%时无侧限抗压强度到达峰值.经过改良的磷石膏可以满足路床路堤的强度要求,综合考虑经济因素后,半水石膏占风干磷石膏质量10%,液黏剂占风干磷石膏质量0.5%为最佳配合比.

(3)85%、95%、100%压实度的20 m及以下高度的路堤均可满足20 cm的工后沉降要求.

参考文献:

- [1] 叶学东.“十二五”期间磷石膏利用现状及当前工作重点[J].硫酸工业,2017(1):40-43.
YE Xuedong. Phosphogypsum utilization situation during the twelfth five-year plan period and current work focus[J]. Sulphuric Acid Industry, 2017(1):40-43.(in Chinese)
- [2] HUANG Y B, QIAN J S, KANG X J, et al. Belite-calcium sulfoaluminate cement prepared with phosphogypsum: Influence of P_2O_5 and F on the clinker formation and cement performances [J]. Construction and Building Materials, 2019, 203:432-442
- [3] 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. A study on engineering characteristics of phosphogypsum and its mixtures[D]. Nanjing: Hohai University, 2005(in Chinese)
- [4] 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. (in Chinese)
- [5] 米占宽,饶徐生,储学群,等.沉积磷石膏的物理力学特性试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(3):470-478.
MI Zhankuan, RAO Xusheng, CHU Xuequn, et al. Physico-mechanical properties of deposition phosphogypsum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 470-478. (in Chinese)
- [6] 荀勇.含工业废料的水泥系固化剂加固软土试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(2):210-213.
XUN Yong. Test on strengthening soft soil with cementary solidifying agent containing industrial waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2):210-213. (in Chinese)
- [7] 董满生,凌天清,徐基立.磷石膏对半刚性基层材料的作用机理[J].中国公路学报,2002,15(2):11-15.
DONG Mansheng, LING Tianqing, XU Jili. Mechanism on the phosphogypsum-improved semi-rigid basecourse [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(2): 11-15. (in Chinese)
- [8] 查进,周明凯,沈卫国.水泥稳定磷渣碎石基层材料的研究[J].公路,2004(12):186-189.
ZHA Jin, ZHOU Mingkai, SHEN Weiguo. A study on

- basecourse of cement stabilizing phosphorous slag and gravel[J]. Highway, 2004(12):186-189. (in Chinese)
- [9] 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.
- LI Zhangfeng. The test study on phosphogypsum used as filling improved the road way [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [10] 曹新文, 李忠金. 一种磷石膏固化剂: CN108585576A [P]. 2018-09-28.
- CAO Xinwen, LI Zhongjin. Phosphogypsum liquid adhesive: CN108585576A [P]. 2018-09-28. (in Chinese)
- [11] 陈忠达, 于吉太, 于少春, 等. 路基路面工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2009.
- CHEN Zhongda, YU Jitai, YU Shaochun, et al. Subgrade and pavement engineering [M]. Beijing: China Communication Press, 2009. (in Chinese)
- [12] 陈善雄, 余颂, 孔令伟, 等. 膨胀土判别与分类方法探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(12):1895-1900.
- CHEN Shanxiong, YU Song, KONG Lingwei, et al. Study on approach to identification and classification of expansive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12):1895-1900. (in Chinese)