

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.01.043

磷钛石膏混合体系无侧限抗压强度

孟维正, 刘伟杰, 曹新文*, 胡志超, 李思江

(西南交通大学 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:为了解决磷、钛石膏工程应用不足之处,对其工程力学性质进行研究并提出改良方案。对磷、钛混合石膏掺加不同配合比的水泥、石灰、石膏及液黏剂进行击实试验和不同配合比、不同龄期、不同干湿循环次数的无侧限抗压强度试验。发现改良体系最大干密度及最佳含水率变化较小,相同压实度钛石膏较磷石膏无侧限抗压强度更高,水泥石灰双掺改良体系较单掺改良体系无侧限抗压强度更高,水泥掺量为3%以上的改良体系强度随龄期增长显著,其无侧限抗压强度随干湿循环次数及水泥掺量增加而增强。

关键词:磷、钛混合石膏;无侧限抗压强度;养护龄期;干湿循环

中国磷石膏堆积量已达到500 Mt,钛石膏堆积量已达130 Mt,磷、钛石膏不但占用大量土地给工厂带来了很大的经济负担,而且随风飘散到空气中更会危害人类身体健康。国内外对磷石膏研究利用主要为充当建材原料、生产水泥原料、农作物肥料、水泥缓凝剂等方面;对钛石膏的研究利用主要是充当土壤改良剂、水泥缓凝剂、轻质墙体等方面。钛石膏作为道路填料在上海已有试点,磷石膏作为路基填料也有大量的研究。杨林等研究了掺加液黏剂、水泥石灰等稳定土的力学收缩特性;徐晓东等研究了掺加偏高岭土对水泥稳定土的强度影响规律;宋亮研究了粉煤灰掺量对水泥稳定路面回收料强度和干缩性能的影响。为了解决磷、钛石膏造成的社会问题,该文在前人研究基础上进一步研究改善其工程力学性质的方案。研究步骤为:研发新型液黏剂;制定不同方案的液黏剂、掺加物(水泥、石灰、石膏)与磷、钛混合石膏的配合比;对不同方案进行击实试验,确定最佳含水率及最大干密度;对不同方案配合比进行饱水及未饱水无侧限抗压强度(UCS)试验,确定抗压强度及水稳定性;对某配合比进行不同养生龄期的UCS试验;对某配合比进行不同干湿循环次数的UCS试验。

1 试验原材料

试验用钛石膏为生产钛白粉过程中用石灰中和酸

性废水产生的固体废渣,室外钛石膏由于 Fe^{2+} 的氧化,呈棕红色,含水率为29%左右。钛石膏的主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,其化学成分见表1,主要杂质为硫酸铁、氢氧化铁、氢氧化镁。风干后钛石膏粒径较小,属于粉土,以板状、柱状结构为主,呈浅黄色。

表1 钛石膏化学成分

成分	占比/%	成分	占比/%
O	48.23	S	10.67
Na	0.22	K	0.12
Mg	3.23	Ca	20.92
Al	1.07	Ti	0.54
Si	2.80	Fe	8.66
P	0.15		

试验用磷石膏为生产磷酸过程中产生的固体废渣。主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,其化学成分见表2。主要杂质为磷酸盐。磷石膏呈弱酸性,含水率为23%左右。天然磷石膏呈深灰色,风干之后呈灰白色,粒径较小,属于粉土,以板状结构为主。

表2 磷石膏化学成分

成分	占比/%	成分	占比/%
SiO_2	19.680	K_2O	0.012
Al_2O_3	6.440	Na_2O	0.035
Fe_2O_3	1.140	SO_3	28.930
CaO	36.470	P_2O_5	0.105
MgO	5.920	Na_2O	0.035

收稿日期:2019-06-10(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划子课题(编号:2016YFB0303603-4)

作者简介:孟维正,男,硕士。E-mail:332157773@qq.com

*通信作者:曹新文,男,副教授。E-mail:389558091@qq.com

原材料除磷钛石膏外还有 P. C. 32. 5 级复合硅酸盐水泥、I 型液黏剂、II 型液黏剂、生石灰、半水石膏等。

2 试验方法及方案

根据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》进行击实试验,确定磷石膏混合钛石膏复合体系各配合比的最佳含水率和最大干密度,按最佳含水率和最大干密度计算每个试块需土质量后制样(按一定压实度),进行无侧限抗压强度试验。

击实试验选择重型击实方法和干土法。根据试验结果绘制击实曲线。制作直径和高度均为 5 cm 的圆柱形试件,体积为 98. 2 cm³。每组编号制作 12 个试样,其中 6 个试样采用连续 6 d 标准养生条件[(20±2)℃,95%以上湿度]养生,第 7 d 饱水养生[(20±2)℃,试件浸泡于水中,水面高于试件顶面 5 cm];6 个试样连续 7 d 在标准养生条件[(20±2)℃,95%以上湿度]下养生。部分采取 14、21、28 d 养生龄期的试样,每个龄期制作 12 个试样。部分试样在标准养生条件[(20±2)℃,95%以上湿度]下养生 7 d 后,进行干湿循环试验(养生结束后饱水 24 h 然后烘箱烘干 12 h 为一次干湿循环)。将养生结束后和干湿循环后的试件放在单轴压力仪上加载,控制轴向加载速度为 1 mm/min,记录无侧限抗压强度试验数据。从压碎试样内部取出代表性土样,测含水率,记录数据。

试验土样方案配合比见表 3。每组液黏剂、水泥、石灰、石膏量按磷石膏、钛石膏干土质量和的百分比掺加,液黏剂按掺加的石灰水泥石膏质量和的 10% 掺加。A 为 I 型液黏剂,A' 为 II 型液黏剂,C 为水泥,L 为石灰,L' 为石灰不同百分比掺量对照组,G 为半水石膏,T 为钛石膏,H 为磷石膏钛石膏质量比 1:1 的混合石膏,HH 为磷石膏钛石膏质量比 4:1 的混合石膏,K 为水稳定系数。

3 试验结果及讨论

3.1 最佳含水率及最大干密度

选磷石膏混合钛石膏复合体系 4 个代表性编号(AC5H、ACL6H、ACL'5H、A'HH)的配合比进行击实试验,4 组击实曲线如图 1 所示。

由图 1 可知:最大干密度为 1. 61~1. 62 g/cm³,最佳含水率为 17. 84%~20. 15%。水泥、石灰、石膏、

表 3 配合比方案及水稳定性

混合体系	A/%	C/%	L/%	G/%	K
AC1T	0. 1	1. 0	0	0	68. 6
AC2T	0. 2	2. 0	0	0	73. 0
AC3T	0. 3	3. 0	0	0	71. 8
AC1H	0. 1	1. 0	0	0	68. 2
AC2H	0. 2	2. 0	0	0	71. 8
AC3H	0. 3	3. 0	0	0	74. 6
AC4H	0. 4	4. 0	0	0	78. 2
AC5H	0. 5	5. 0	0	0	83. 5
ACL1H	0. 2	1. 0	1. 0	0	73. 1
ACL2H	0. 3	2. 0	1. 0	0	75. 1
ACL3H	0. 4	3. 0	1. 0	0	78. 3
ACL4H	0. 5	4. 0	1. 0	0	84. 4
ACL5H	0. 6	5. 0	1. 0	0	85. 3
ACL6H	0. 7	6. 0	1. 0	0	87. 7
ACL'1H	0. 1	0. 5	0. 5	0	68. 6
ACL'2H	0. 2	1. 0	1. 0	0	74. 2
ACL'3H	0. 3	1. 5	1. 5	0	76. 1
ACL'4H	0. 4	2. 5	2. 5	0	86. 6
ACL'5H	0. 5	3. 5	3. 5	0	88. 1
A'GH	0. 1	0	0	1. 0	63. 4
A'H	1. 0	0	0	0	60. 3
A'GHH	0. 1	0	0	1. 0	69. 2
A'HH	1. 0	0	0	0	63. 2

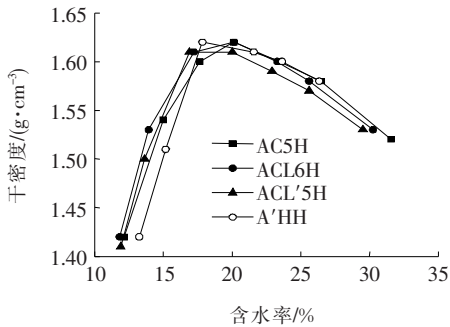


图 1 击实曲线

液黏剂的掺量对钛石膏的最佳含水率及最大干密度影响较小,这是由于掺加量较少所致。无侧限抗压强度试块按含水率 18%,密度 1. 90 g/cm³,即按压实度 93%进行制样。

3.2 无侧限抗压强度

标准养护 6 d 饱水 1 d 无侧限抗压强度以 q_u 表

示,标准养护 7 d 无侧限抗压强度以 q_u' 表示。ACT 系列与 ACH 系列无侧限抗压强度对比如图 2 所示。ACH 系列与 ACLH 系列无侧限抗压强度对比如图 3 所示。ACLH 系列与其对比组结果见图 4。其余编号无侧限抗压强度见表 4。

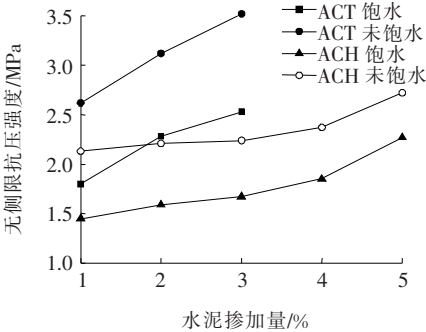


图 2 ACT 与 ACH 系列强度对比

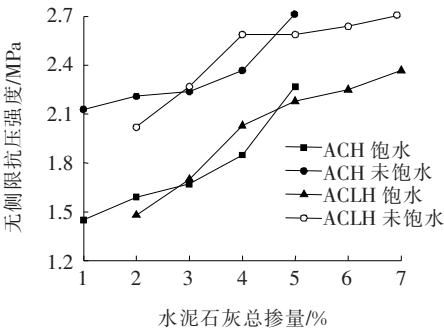


图 3 ACH 与 ACLH 系列强度对比

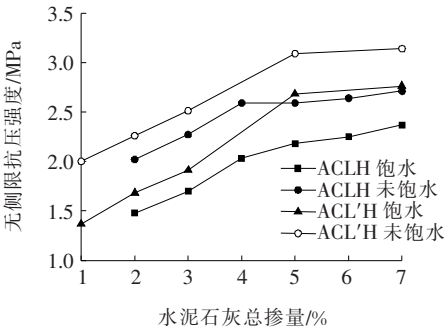


图 4 ACLH 与 ACL'H 强度对比

表 4 无侧限抗压强度		
混合体系	q_u'/kPa	q_u/kPa
A'GH	1 105.20	1 744.16
A' H	1 046.30	1 734.16
A'HH	952.87	1 376.79
A'GHH	831.64	1 315.22

由图 2 可知:掺加相同质量比水泥,纯钛石膏强度

要高于磷钛混合石膏,由此可见相同压实度时钛石膏的强度高于磷石膏。由图 3 可知:饱水和未饱水时,水泥石灰复掺的磷钛混合石膏强度都与单掺水泥的强度接近,说明用石灰掺量较少时,其改良效果与水泥相同。由图 4 可知:磷钛混合石膏中,等比例双掺水泥石灰较双掺水泥石灰(低百分比石灰)强度更高,说明石灰掺量较多时,复掺效果优于单掺。由图 2~4 可知:每个编号的饱水强度线斜率都略微大于未饱水强度线,说明掺量越大,水稳定性越好。

产生上述差异的原因是水泥和石灰强化土质过程的差异。水泥是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,空间网络逐渐变密实现硬化,最后 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生碳酸反应,强度提高。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,接着开始火山灰反应,土体密实度、强度水稳性都有提高,最后熟石灰碳酸化增强土体强度。双掺时,水泥中 SiO_2 及 Al_2O_3 与石灰充分发生火山灰反应,较单掺形成更高强度。

由表 4 可知:掺加干土重 1% 的半水石膏对磷钛混合石膏饱水和未饱水的强度影响极小。磷石膏与钛石膏质量比为 4:1 时的强度低于质量比为 1:1 时的强度。

对 AC1H、AC3H、AC5H(仅掺加水泥和液黏剂) 3 个不同配合比(每个配合比 6 个试块)进行 7、14、21、28 d 连续标准条件养生;对 AC1H、AC3H、AC5H(每个配合比 6 个试块)进行 6、13、20、27 d 连续标准养生后各饱水 24 h。养生结束后进行无侧限抗压强度试验,其结果见图 5、6。由图 5、6 可得:AC3H、AC5H 强度与龄期呈乘幂函数式增长,AC1H 增长幅度极小,其原因为水泥石灰掺量较少所致。AC3H 和 AC5H 在 14 d 内强度增长明显,14~28 d 水稳性较第 7 d 略有提高,水泥凝结完成度提高。

对 AC1H、AC3H、AC5H(仅掺加水泥和液黏剂)标准条件下养生 7 d 后进行 3、6、9、12 和 15 次干湿循环,然后进行无侧限抗压强度试验,试验结果见图 7。由图 7 可得:水泥掺量为 1% 的磷钛混合石膏组在干湿循环后,强度略有上涨;水泥掺量为 3% 的磷钛混合石膏组干湿循环后强度上涨明显,在干湿循环 9 次后,强度保持稳定,干湿循环 12 次后强度略有下降;水泥掺量为 5% 的磷钛混合石膏组干湿循环后强度上涨明显,在干湿循环 15 次后仍有上涨趋势。产生上述现象

的原因是 7 d 养护龄期下掺加水泥的磷钛混合石膏外部土层发生水化及碳酸反应后形成较密网格阻碍了内部土体水化及碳酸化等反应,干湿循环为内部土层提供了化学反应和物理变化的条件,因此强度有所上升。

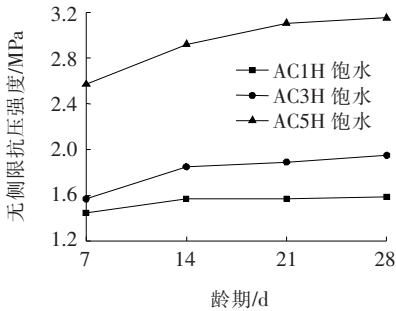


图 5 龄期与饱水 ACH 的无侧限抗压强度关系

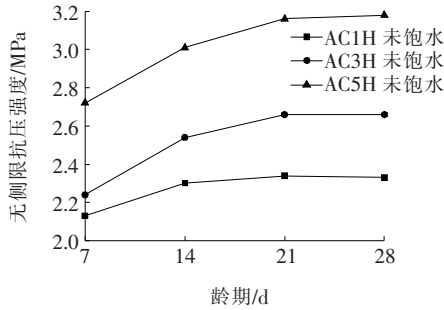


图 6 龄期与未饱水 ACH 的无侧限抗压强度关系

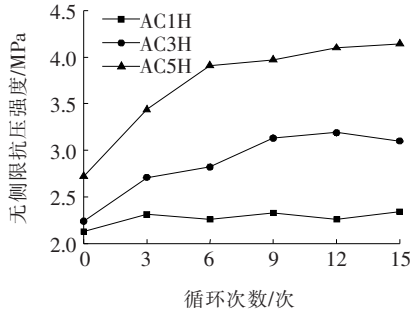


图 7 干湿循环次数与 ACH 的无侧限抗压强度关系

3.3 水稳定性

为了比较各配合比改良效果优劣,引入水稳定性系数 K (7 d 龄期饱水后无侧限强度与未饱水无侧限强度之比),各配合比水稳定系数计算结果见表 3。由表 3 前 4 个系列配合比水稳定性结果可知,掺加水泥、石灰组水稳定性较只掺加水泥组的磷钛混合石膏复合体系水稳定性系数更高,等比例掺加水泥石灰组较只掺加 1% 石灰的水泥石灰组水稳定性系数更高。由于水泥石灰的结晶硬化作用与磷石膏钛石膏形成共晶

体,水稳性有所提高;火山灰作用的胶凝物在微土团外围形成保护膜,减少了土间空隙,降低了渗透性,提高了磷、钛混合石膏水稳性。由表 3 后两个系列配合比水稳定性结果可知,石膏掺量对水稳性影响甚微,即 CaSO_4 浓度对水稳定性影响甚微;Ⅱ型液黏剂对磷石膏的水稳性改善效果优于对钛石膏。

4 结论

(1) 相同压实度时,钛石膏较磷石膏和磷钛混合石膏无侧限抗压强度更高,磷、钛混合石膏水泥石灰双掺较单掺无侧限抗压强度更高。 CaSO_4 纯度对磷钛混合石膏无侧限抗压强度没有影响。

(2) 磷、钛混合石膏水泥改良组,水泥掺量为 3% 及以上时,随着龄期增长,饱水和未饱水无侧限抗压强度上涨明显,水稳性逐渐增强,水泥掺量为 1% 时不起作用。

(3) 磷、钛混合石膏水泥改良组,水泥掺量为 3% 及以上时,无侧限抗压强度增长量与干湿循环次数及水泥掺量成正比。

(4) 磷、钛混合石膏水泥石灰双掺较单掺水稳性更好。 CaSO_4 纯度对磷钛混合石膏无侧限抗压强度没有影响。

参考文献:

[1] 杨冬蕾.我国磷石膏和钛石膏资源化利用进展及展望[J].硫酸工业,2018(10).
[2] 赵玉静,施惠生.粉煤灰-钛白石膏路基材料的研究[J].建筑材料学报,2000(4).
[3] 施惠生,赵玉静,李纹纹.钛石膏-粉煤灰-矿渣复合胶凝材料的改性研究[J].粉煤灰综合利用,2002(2).
[4] 李章锋.磷石膏改良土用作路基及基层填料的试验研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2007.
[5] 杨林,刘雨彤,宋玉鑫.外加剂改性水泥石灰土力学及收缩特性试验研究[J].中外公路,2018(1).
[6] 宋亮.粉煤灰掺量对水泥稳定路面回收料强度和干缩性能的影响[J].中外公路,2017(4).
[7] 徐晓东,王林浩,刘剑平,等.偏高岭土对水泥土强度影响的试验研究[J].中外公路,2017(1).
[8] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].
[9] 陈忠达,于吉太,于少春.路基路面工程[M].北京:人民交通出版社,2009.