

# 磷石膏—二灰混合料性能试验研究

余建伟, 钱国平, 彭怀志

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 根据已有研究成果确定 3 种磷石膏—二灰混合料配合比, 对其分别进行抗压回弹模量、无侧限抗压强度、抗冲刷性和水稳定性试验, 并与几种常用底基层材料性能进行对比。结果表明, 在二灰中掺入适量磷石膏, 其强度、抗压回弹模量、抗冲刷性和水稳定性得到提高, 但磷石膏与粉煤灰的比例超出 1:3~1:1 时会影响上述性质; 与磷石膏—二灰混合料相比, 加入碎石的磷石膏—二灰混合料的强度、抗压回弹模量和水稳定性显著提高。

**关键词:** 公路; 底基层; 磷石膏—二灰混合料; 力学性能; 抗冲刷性; 水稳定性

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0110-04

作为废弃物的磷石膏在中国逐年增加, 其综合利用率却增加不明显, 特别在磷化工大省贵州省, 磷石膏作为生产磷肥的副产品, 已大量堆积, 若将磷石膏用于公路建设, 可取代部分原材料, 减少过度开采碎石对生态环境造成的破坏, 大量节省原材料运费, 降低工程造价, 对促进公路工程的可持续发展和资源的循环利用具有重要意义。

二灰类混合料虽然具有刚度好、强度高优点, 但由于石灰和粉煤灰之间的火山灰反应很慢, 混合料的早期强度较低, 限制了其应用。如何将磷石膏加入二灰混合料中得到可降低原材料成本的新型公路底基层材料, 是道路研究者的重要研究方向。尽管磷石膏在土木工程方面已得到不少应用并取得了一些成果, 但在道路工程领域的应用较少, 主要存在磷石膏掺量和利用率偏低、底基层早期强度不足、抗冲刷性和水稳定性差等问题, 需进一步研究。该文结合工程实际及相关研究设计 3 种配合比磷石膏—二灰混合料进行性能试验研究, 分析在底基层中大量掺加磷石膏的可行性及大量掺入磷石膏的二灰混合料的早期强度、抗冲刷性能和水稳定性。

## 1 原材料和配合比

### 1.1 原材料

所用粉煤灰来自株洲某火电厂。石灰为Ⅲ级消石灰, 经生石灰消解所得。磷石膏取自贵州省某集团的工业废料, 其主要成分检验结果见表 1。

### 1.2 集料和配合比

通过干筛法对所取石料进行筛分试验, 得到合成级配(见表 2)。

表 1 磷石膏的化学组成 %

| 次数    | 各成分的含量           |       |                 |
|-------|------------------|-------|-----------------|
|       | SiO <sub>2</sub> | CaO   | SO <sub>3</sub> |
| K-I   | 2.71             | 30.52 | 43.18           |
| K-II  | 2.54             | 25.92 | 37.98           |
| K-III | 1.80             | 27.83 | 39.08           |
| W-I   | 7.19             | 30.58 | 41.93           |
| W-II  | 4.23             | 31.06 | 43.92           |
| W-III | 7.60             | 29.81 | 41.60           |
| W-IV  | 3.36             | 30.94 | 43.78           |
| W-V   | 6.45             | 30.19 | 42.38           |
| W-VI  | 3.23             | 31.06 | 43.46           |
| 标准差   | 2.17             | 1.76  | 2.10            |

表 2 合成级配结果

| 级配类型 | 各筛孔(mm)的通过百分率/% |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 31.5            | 26.5  | 19    | 9.5   | 4.75  | 2.36  | 0.6   | 0.075 |
| 合成级配 | 100             | 99.2  | 80.51 | 58.63 | 37.77 | 22.03 | 11.12 | 4.14  |
| 级配上限 | 100             | 100.0 | 89.00 | 67.00 | 49.00 | 35.00 | 22.00 | 7.00  |
| 级配下限 | 100             | 90.0  | 72.00 | 47.00 | 29.00 | 17.00 | 8.00  | 0.00  |
| 级配中值 | 100             | 95.0  | 80.50 | 57.00 | 39.00 | 26.00 | 15.00 | 3.50  |

H. Motz 等对磷石膏—二灰体系作了系统研究, 提出了如下配比: 磷石膏 0~65%、粉煤灰 33%~60%、石灰 6%~11%, 粉煤灰: 石灰=3~10。沈卫国等研究发现在二灰中掺入适量磷石膏且磷石膏与二灰比不大于 1:1 时, 路面的 28 d 强度能达到传统二灰类材料的 60 d 强度, 石灰最佳含量为 6%~8%, 磷石膏的掺量不应比粉煤灰大, 两者比例应控制在 1:3~1:1。如果使用石灰最低含量即

6%,则磷石膏:粉煤灰=1:1时磷石膏的用量最大,陶松的研究结果表明当石灰:磷石膏:粉煤灰=6:47:47时,7和28 d强度最大。

根据上述研究成果,通过正交设计分析,选出早期强度(7、28 d)相对较高、磷石膏所占比例较高的配合比作为研究对象,确定A、B、C 3种配合比磷石膏一二灰混合料(见表3),并以这3种配合比进行磷石膏一二灰混合料性能试验研究。

表3 磷石膏一二灰混合料的配合比

| 配合比编号 | 混合料类型         | 配合比        |
|-------|---------------|------------|
| A     | 磷石膏:粉煤灰:石灰    | 60:32:8    |
| B     | 磷石膏:粉煤灰:石灰    | 40:54:6    |
| C     | 磷石膏:粉煤灰:石灰:碎石 | 15:20:6:59 |
| D     | 土:石灰          | 90:10      |
| E     | 土:粉煤灰:石灰      | 80:12:8    |
| F     | 粉煤灰:石灰        | 90:10      |
| G     | 粉煤灰:石灰:碎石     | 17:8:75    |
| D'    | 粉煤灰:石灰        | 92:8       |
| E'    | 磷石膏:粉煤灰:石灰    | 60:34:6    |
| F'    | 粉煤灰:石灰:碎石     | 30:5:65    |

## 2 力学性能试验及结果分析

### 2.1 抗压回弹模量试验与分析

用A、B、C配合比制作 $\phi 150 \times 150$  mm圆柱体试件,通过静压成型,在标准养护室(温度为 $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,湿度 $\geq 95\%$ )进行养护,得到各配合比混合料不同龄期下的抗压回弹模量(见图1)。

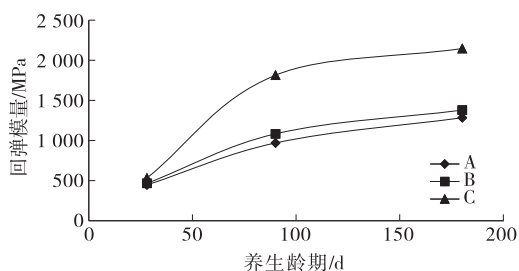


图1 3种配合比磷石膏一二灰混合料回弹模量随龄期的变化

从图1可见:1) 3种配合比磷石膏一二灰混合料的抗压回弹模量大小为 $C > B > A$ ,这是因为C中含有大量碎石,故其抗压回弹模量最大。对于A与B配合比,在相同龄期时,B配合比的抗压回弹模量大于A配合比,而两者所含的石灰量差不多,这是因为A中磷石膏掺量过多,部分磷石膏并未有效参与到二灰的反应中。当石灰掺量为6%~10%时,

磷石膏:粉煤灰为1:3~1:1较为合理。2) 3种配合比的抗压回弹模量都随着龄期的增加而不断增加,且增加速率逐渐变小,这是因为各配合比混合料的早期刚度主要由原材料本身模量和材料组成结构形式所决定,在反应初期,胶结料的含量不足,难以使混合料具有较高刚度,但随着龄期的增加,反应不断进行,生成的胶结料越来越多,颗粒间的连接性和整体性越来越强,表现为回弹模量越来越大;而随着龄期的增加,后期生成的胶结料相对前期减少,导致抗压回弹模量增加速率也减小。说明磷石膏一二灰混合料的模量受龄期变化的影响较显著。

将磷石膏一二灰混合料与几种常用底基层材料(其配合比见表3)进行180 d抗压回弹模量比较,结果见表4。

表4 不同类型底基层材料的抗压回弹模量对比 MPa

| 配合比编号 | 180 d 回弹模量 | 配合比编号 | 180 d 回弹模量 |
|-------|------------|-------|------------|
| A     | 1 284      | E     | 1 236      |
| B     | 1 379      | F     | 1 279      |
| C     | 2 146      | G     | 1 126      |
| D     | 1 142      |       |            |

从表4可见:A、B配合比磷石膏一二灰混合料的180 d抗压回弹模量都大于D、E、F即石灰土、二灰土、二灰混合料,说明掺入适量磷石膏能提高二灰混合料的模量;C配合比磷石膏一二灰混合料的180 d抗压回弹模量远大于G配合比即二灰稳定碎石混合料的模量,而二者粉煤灰和石灰的掺量相当,说明加入适量磷石膏对提高二灰碎石混合料的模量效果显著。

### 2.2 无侧限抗压强度试验与分析

按前述试件成型及养生方法成型试件,对A、B、C配合比混合料进行7、28、90、180 d无侧限抗压强度试验,试验结果见图2。

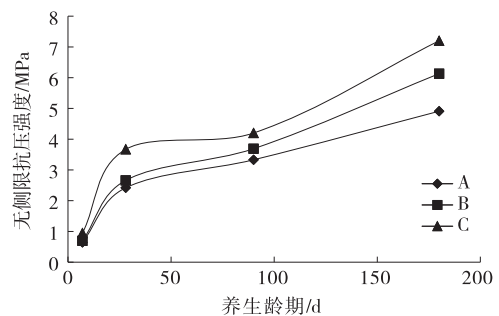


图2 养生龄期对3种配合比磷石膏一二灰混合料强度的影响

从图2可见:1) 3种配合比磷石膏—二灰混合料的强度大小为 $C > B > A$ ,这是因为C中碎石含量较大,而A与B没有。3种配合比混合料28d前的强度平均增长速率大于28d后的强度平均增长速率,因为一开始粉煤灰和石灰之间的火山灰反应较剧烈,生成的凝胶较多,这是磷石膏—二灰混合料强度形成的基础;而随着时间的延长,反应物质减少,反应相对减弱,故强度增长速率变慢。2) 随着龄期的增长,A、B配合比混合料的强度不断增加,B配合比混合料的强度增长速度在早期和后期都比A快。二者石灰用量差不多,A中磷石膏的质量约为粉煤灰的2倍,其各龄期无侧限抗压强度都比B配合比(磷石膏:粉煤灰 $\approx 1:1$ )的低,这是因为A中磷石膏掺量过多,过量的石膏并未有效参与到石灰粉与煤灰的反应中,反而会影响其强度发展。

将磷石膏—二灰混合料与几种常用底基层材料(其配合比见表3)进行早期无侧限抗压强度比较,结果见表5。

表5 不同类型底基层材料的早期强度对比 MPa

| 配合比<br>编号 | 无侧限抗压强度 |      | 配合比<br>编号 | 无侧限抗压强度 |      |
|-----------|---------|------|-----------|---------|------|
|           | 7 d     | 28 d |           | 7 d     | 28 d |
| A         | 0.645   | 2.42 | D'        | 0.520   | 0.67 |
| B         | 0.695   | 2.66 | E'        | 0.576   | 0.85 |
| C         | 0.945   | 3.67 | F'        | 0.823   | —    |

从表5可见:1) 配合比A与D'相比,两者中石灰含量相等,A中加入了磷石膏,相当于把D'中的部分粉煤灰替换为磷石膏,D'中没有加磷石膏,A混合料的7、28d无侧限抗压强度远大于D'混合料,说明以部分磷石膏取代粉煤灰不但有利于磷石膏的消耗,而且能大幅提高二灰混合料的强度。2) 配合比C与F'相比,C中加入了磷石膏,F'中的碎石含量多于C,但不含磷石膏,C混合料的7d无侧限抗压强度大于F',说明在二灰碎石混合料中加入磷石膏可提高其早期无侧限抗压强度。3) B与E'配合比的石灰含量相等,E'中磷石膏含量高于B,B混合料的7和28d强度都大于E',再次证明磷石膏掺量超过一定范围反而会影响其强度发展。4) 3种磷石膏—二灰混合料的7d强度都满足规范要求( $\geq 0.6$  MPa),且在二灰中加入磷石膏后早期强度都得到提高。因为粉煤灰的活性被磷石膏激活,加速了

粉煤灰同石灰之间的火山灰反应速度,而且参与了该反应,形成了大量细针状的钙矾石,钙矾石在形成过程中会有膨胀作用,从而使内部结构孔径更小、空隙率降低、更加密实,这有利于强度的增加。

### 3 抗冲刷性和水稳定性试验及结果分析

#### 3.1 抗冲刷性能试验与分析

采用前述方法用A、B、C配合比成型试件,养生28d后采用振动台进行抗冲刷性能试验,振动频率为50 Hz。振动5 min,待冲刷掉的物质沉淀后将其倒入容器中进行烘干,用称得的干料计算每分钟冲刷的物料重量,以每分钟的冲刷损失量作为冲刷指标。对磷石膏—二灰混合料与二灰混合料的抗冲刷性进行比较,结果见表6。

表6 不同配合比混合料的抗冲刷试验结果

| 配合比<br>编号 | 不同冲刷时间(h)的<br>冲刷损失量/(g·min <sup>-1</sup> ) |        |
|-----------|--|--------|
|           | 2  | 4      |
| A         | 12.74                                      | 20.34  |
| B         | 8.24                                       | 15.56  |
| C         | 17.28                                      | 30.38  |
| D'        | 57.98                                      | 152.80 |

从表6可见:1) 3种配合比磷石膏—二灰混合料浸泡4h时的冲刷量大于浸泡2h时的冲刷量,说明随着浸泡时间的延长,其抗冲刷性能越来越低。B的冲刷量比A的低,说明掺入适量的磷石膏可提高磷石膏—二灰混合料的抗冲刷性能,但掺入过多反而会影响其抗冲刷性能。2) 各配合比混合料的抗冲刷性能优劣为 $B > A > C$ ,B配合比混合料在浸泡2、4h后每分钟的冲刷损失量大约为C配合比的1/2,因为掺有碎石的试件孔隙比较大且多,容易被冲刷掉。3) A与B配合比的冲刷量比D'小得多,A与B中都加入了磷石膏,而D'中没有,说明二灰中加入磷石膏可显著改善其抗冲刷能力。

#### 3.2 水稳定性性能试验与分析

按前述方法成型试件,设定28d龄期,在不同养生方式下进行养生,测试试件的无侧限抗压强度。养生方式H为湿养28d,不浸水;养生方式I为湿养27d,浸水1d;养生方式J为湿养7d,浸水21d。不同配合比磷石膏—二灰混合料在不同养生方式下的水稳定性性能及与配合比D'即二灰混合料的对比见表7。

表 7 不同配合比混合料在不同养生方式下的强度

| 配合比<br>编号 | 28 d 强度/MPa |      |      | 强度比/% |       |       |
|-----------|-------------|------|------|-------|-------|-------|
|           | H           | I    | J    | H     | I     | J     |
| A         | 3.16        | 2.42 | 1.63 | 100   | 76.60 | 51.60 |
| B         | 3.23        | 2.66 | 1.63 | 100   | 82.40 | 50.50 |
| C         | 3.89        | 3.67 | 2.39 | 100   | 94.30 | 61.40 |
| D'        | —           | 1.88 | 1.50 | —     | —     | —     |

从表 7 可见:1) 在 H、I、J 3 种养生方式下,随着浸水时间的延长,A、B、C 3 种混合料的强度都逐渐降低,说明 3 种混合料的水稳定性随着浸水时间的延长逐渐降低。在 I 养生方式下,3 种混合料水稳定性优劣为 C>B>A;在 J 养生方式下,依然是 C 的水稳定性最强,A 与 B 相当。说明掺入碎石的二灰混合料的水稳定性会有大幅度提升。2) 在 I 和 J 2 种养生方式下,A 与 B 2 种磷石膏一二灰混合料的强度大于二灰混合料 D',A 与 B 中掺加了磷石膏,而 D'中没有,说明磷石膏的加入有利于改善混合料的水稳定性。

#### 4 结论

(1) 在二灰中掺入大量磷石膏取代部分粉煤灰可提高其强度、抗压回弹模量、抗冲刷性和水稳定性,但磷石膏与粉煤灰的比例超过 1:3~1:1 反而会影响上述性质。

(2) 与磷石膏一二灰混合料相比,磷石膏一二灰碎石混合料的抗冲刷性能较低,但其强度、抗压回弹模量和水稳定性有大幅提高,适合在实际工程中推广应用。

(上接第 100 页)

#### 4.3 数据处理

根据评定路段路面破损状况检测结果,计算其路面损坏长度或面积,根据需要可计算破损率、断板率等指标。

#### 5 结语

该文对水泥砼路面的典型破损类型及形成机理进行了总结和分析,针对现行水泥砼路面损坏评价标准中存在的不足提出了指导性意见和建议,并补充提出了接缝料损坏率、坏板率、裂缝度和裂缝率等评定指标,用来指导水泥砼路面的日常养护和处治。另外,提出了水泥砼路面的破损检测方法,用于指导

(3) 在二灰道路底基层中掺入大量磷石膏取代部分粉煤灰,有利于磷石膏这种废料的消耗,提高经济和社会效益。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陶松,苏亚兰,李杰,等.稳定剂对磷石膏作为道路填料性能的影响[J].交通科技,2012(3).
- [3] H Motz,J Geiseler.Products of steel slags an opportunity to save natural resources[J].Waste Manement,2001,21(2).
- [4] 丁建文,石名磊,刘维正.道路底基层中磷石膏—石灰二灰土再生试验研究与应用[J].东南大学学报:自然科学版,2009,39(1).
- [5] 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.
- [6] 王崇涛,郑木莲,王选仓.半刚性基层不同龄期弯沉检验标准[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(6).
- [7] 沈卫国,周明凯,余崇峻,等.磷石膏改性二灰路面基层材料的性能研究[J].武汉理工大学学报,2003,25(10).
- [8] 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).
- [9] Manjit Singh.Treating waste phosphogypsum for cement and plaster manufacture[J].Cement and Concrete Research,2002,32(7).
- [10] 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.

收稿日期:2016-06-06

水泥砼路面的日常或专项破损检测。

#### 参考文献:

- [1] 彭晓飞,杨立华.水泥混凝土路面破碎板病害成因、维修及早期预防[J].黑龙江交通科技,2004(8).
- [2] 丁武洋,周爱成.新版《公路技术状况评定标准》应用探讨[J].现代交通技术,2009(4).
- [3] JTJ 073.1-2001,公路水泥路面养护技术规范[S].
- [4] JTG H20-2007,公路技术状况评定标准[S].
- [5] 朱胜雪.公路交通安全养护评价指标及方法研究[J].公路,2013(9).
- [6] 曹剑波,周海军,杨春放.旧水泥砼路面性能综合评价指标体系研究[J].公路与汽运,2007(5).

收稿日期:2016-08-17