

文章编号: 0451-0712(2006)02-0121-05

中图分类号: U414.01

文献标识码: A

水泥粉煤灰砂砾综合路用性能研究

李炜光, 申爱琴

(长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室 西安市 710064)

摘 要: 针对二灰稳定、水泥稳定类材料在使用中存在的缺陷, 在室内选取了4类级配和9个方案对水泥粉煤灰稳定砂砾的综合路用性能进行了测试研究, 通过对比不同集料级配、不同水泥粉煤灰比例以及不同粉煤灰掺量与综合路用性能之间的关系, 发现掺加适量粉煤灰, 提高了混合料强度增长能力以及劈裂强度, 提高了混合料抗裂性能。结合测试结果, 推荐了水泥粉煤灰砂砾的集料级配及粉煤灰掺加比例。

关键词: 公路工程; 路用性能; 水泥粉煤灰砂砾

我国多年来使用半刚性材料用于基层的修筑, 其中水泥稳定以及二灰稳定是较常使用的两种结构形式。水泥稳定类结构初期投资高、抗裂性能差, 早期强度虽然高, 但后期强度增长缓慢; 此外, 受凝结时间的限制, 施工中过压现象较为普遍^[1,2], 也降低了此类结构的使用质量。石灰或石灰粉煤灰稳定集料多用于低等级公路基层或高等级公路底基层的建设, 近年来, 随着大量工程项目的上马, 石灰粉煤灰稳定类结构缺点日益显著, 如优质石灰匮乏、消解难度大、污染环境, 早期强度低, 尤其不适合改建公路工程的修筑; 此外, 唧浆现象严重、层间结合差, 也是制约此类结构的使用因素。上述两种结构性能差异显著, 但互补性很强, 很多大修工程的调查结果表明, 结构中留下的往往都是二灰稳定类结构, 水泥稳定类结构破碎严重^[1]。如何针对水泥稳定以及石灰粉煤灰稳定类材料的缺点提出替代材料, 对减少上述问题、确保低造价公路的修筑, 促进粉煤灰使用都显得尤为必要^[1]。

水泥粉煤灰砂砾成本低廉、后期强度高、整体性能好、易于施工, 且原材料蕴藏量丰富, 特别适合修筑高等级公路基层、底基层及低造价公路^[1]。大量研究及实践表明, 此类结构可以承受高等级公路交通荷载要求^[1], 但对此类材料研究较少^[2], 制约了对其的推广应用。在国家实施西部开发战略以及大力建设农村公路的今天, 此类研究已刻不容缓^[1], 研究中通过对不同集料级配水泥粉煤灰稳定砂砾综合路用性能的测试与分析, 确定了集料级配与混合料配比

组成。

1 试验方案简介

1.1 原材料

(1) 水泥选取了太行牌普通硅酸盐水泥, 粉煤灰选取了该地两个电厂的粉煤灰, 技术标准详见表1和表2所示。

表1 水泥技术指标

| 水泥名称 | 强度/MPa | | 安定性 | 细度/% | 凝结时间/min | |
|------------------|--------|------|-----|------|----------|-----|
| | 3 d | 28 d | | | 初凝 | 终凝 |
| 太行牌 32.5(R)水泥 | 15.5 | 33.5 | 合格 | 5.4 | 174 | 270 |

表2 粉煤灰技术指标

| 粉煤灰产地 | A 电厂 | B 电厂 |
|---|-------|-------|
| 比表面积/(cm ² /g) | 4 615 | 3 184 |
| 需水量比/% | 95 | 91 |
| 烧失量/% | 13.11 | 14.46 |
| SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、Fe ₂ O ₃ 含量/% | 73.4 | 72.5 |
| SO ₃ 含量/% | 0.65 | 0.42 |
| 表观密度/(g/cm ³) | 1.94 | 1.89 |

考虑到A电厂的粉煤灰比较细, 所以本研究选用A厂粉煤灰。

(2) 钢渣。由于二灰砂砾需要掺配后使用, 而调查发现, 该区钢渣资源丰富, 价格低廉(3~4元/m³), 该区蕴藏量大的两种钢渣技术指标见表3所示。

表 3 钢渣物理力学性能试验结果

| 材料 | 视密度 g/cm ³ | 磨耗率/% | 压碎值/% | 无侧限 抗压强度/MPa |
|-------|--------------------------|-------|-------|-----------------|
| A 钢铁厂 | 2.67 | 21.45 | 25.5 | 59.0 |
| B 钢铁厂 | 2.94 | 19.64 | 23.0 | 81.8 |

由表 3 可见,B 钢铁厂钢渣视密度大、强度高,

无侧限抗压强度大,磨耗率小,达到岩浆类Ⅲ级石料标准,满足基层力学强度要求,压碎值小于 30%,满足基层粒料使用要求,因此从物理力学性能来看,该钢铁厂的钢渣可用于基层的修筑。

1.2 试验方案

选取水泥粉煤灰砂砾进行室内测试及分析,各方案集料级配见表 4 所示。

表 4 研究方案集料级配汇总

| 级配类型 | 钢渣掺量(占集料 总量)/% | 通过下列筛孔(mm)的质量百分率/% | | | | | | | | |
|--------|-------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | | 37.5 | 31.5 | 19 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.075 |
| G-1 | 钢渣掺量 35% | 100 | 91.1 | 68.0 | 51.5 | 43.0 | 39.7 | 33.2 | 26.6 | 4.6 |
| G-2 | 钢渣掺量 25% | 100 | 91.7 | 71.6 | 57.2 | 49.4 | 45.8 | 38.3 | 30.7 | 5.3 |
| G-3 | 天然级配 | 100 | 93.2 | 80.4 | 71.2 | 65.3 | 61.1 | 51.1 | 40.9 | 7.0 |
| G-4 | 规范中值 | 100 | 92.5 | 75 | 60 | 45.0 | 35 | 26 | 18.5 | 7.5 |
| 推荐级配上限 | | 100 | 85 | 70 | 53 | 40.0 | 35 | 27 | 21 | 10 |
| 规范上限 | | 100 | 100 | 85 | 70 | 55.0 | 45 | 35 | 27 | 15 |
| 规范下限 | | 100 | 85 | 65 | 50 | 35.0 | 25 | 17 | 10 | 0 |

本文中的代号说明:“C”代表水泥类材料,前一数字代表级配类型,后一数字代表粉煤灰与水泥的比例,例如对于“C1-2”,其中前一数字“1”代表集料级配采用 G-1,后一数字“2”代表粉煤灰与水泥的比例为 2:1。

2 力学性能研究

2.1 抗压强度

水泥(粉煤灰)砂砾在各龄期浸水无侧限抗压强度结果见表 5。

表 5 水泥(粉煤灰)稳定砂砾各龄期抗压强度汇总

| 代号 | 级配类型 | 强度代表值/MPa | | | | 变异系数 C _v /% | | | |
|------|------|-----------|------|-------|-------|------------------------|------|------|-------|
| | | 7 d | 28 d | 90 d | 180 d | 7 d | 28 d | 90 d | 180 d |
| C1-0 | G-1 | 2.51 | 6.19 | 6.81 | 7.25 | 9.4 | 5.3 | 6.6 | 8.1 |
| C3-0 | G-3 | 1.61 | 4.17 | 4.94 | 5.66 | 7.9 | 6.3 | 8.9 | 6.8 |
| C4-0 | G-4 | 2.77 | 5.31 | 6.14 | 6.67 | 9.7 | 7.4 | 6.8 | 11.2 |
| C1-1 | G-1 | 3.08 | 7.17 | 10.69 | 12.16 | 9.9 | 10.1 | 8.2 | 9.2 |
| C3-1 | G-3 | 2.05 | 5.01 | 6.70 | 8.16 | 7.8 | 10.5 | 8.1 | 8.9 |
| C1-2 | G-1 | 2.61 | 6.98 | 10.40 | 12.39 | 8.7 | 7.4 | 9.5 | 7.6 |
| C3-2 | G-3 | 1.74 | 4.75 | 6.82 | 8.44 | 8.4 | 9.2 | 6.9 | 9.4 |
| C1-3 | G-1 | 1.96 | 5.32 | 8.71 | 10.44 | 10.1 | 8.8 | 6.1 | 9.9 |
| C3-3 | G-3 | 1.17 | 3.25 | 5.06 | 6.42 | 7.3 | 8.4 | 7.5 | 8.6 |

由表 5 可见,不同级配、不同水泥粉煤灰比例混合料强度增长幅度互不相同。对应 G-1 级配水泥砂砾 C1-0 方案虽然早期强度低于规范中值级配 C4-0 方案,但 28 d 时超过前者 16.6%,表明该方案强度增

长潜力大。粉煤灰掺量为 5%、10%、15% 时,对应 G-1 级配各配合比方案的早期、后期强度最高。

参照现有研究成果^[1],对不同龄期段强度回归,确定强度增长率见表 6。

表6 不同龄期水泥(粉煤灰)砂砾强度增长率汇总

| 代号 | 不同时间段内的强度增长率 | | | 对应不同时间段内的 回归直线R ² 值 | | |
|------|--------------|--------|---------|-----------------------------------|---------|---------|
| | 7~28 d | 7~90 d | 7~180 d | 7~28 d | 7~90 d | 7~180 d |
| C1-0 | 6.11 | 3.95 | 3.27 | 1 | 0.888 5 | 0.870 5 |
| C3-0 | 4.25 | 3.04 | 2.78 | 1 | 0.938 1 | 0.950 3 |
| C4-0 | 4.22 | 3.08 | 2.72 | 1 | 0.945 5 | 0.943 3 |
| C1-1 | 6.79 | 6.86 | 6.54 | 1 | 0.999 9 | 0.997 2 |
| C3-1 | 4.92 | 4.22 | 4.23 | 1 | 0.988 6 | 0.993 9 |
| C1-2 | 7.26 | 7.03 | 6.93 | 1 | 0.999 6 | 0.999 5 |
| C3-2 | 5.00 | 4.59 | 4.67 | 1 | 0.996 8 | 0.998 0 |
| C1-3 | 5.58 | 6.07 | 6.08 | 1 | 0.997 3 | 0.998 5 |
| C3-3 | 3.45 | 3.54 | 3.61 | 1 | 0.981 4 | 0.989 8 |

由表6可见,粉煤灰掺量为零时,对应G-1级配水泥砂砾C1-0方案各龄期强度增长率均高于对应其他级配配比方案;如C1-0方案7~28 d强度增长率是对应规范中值级配C4-0方案的1.45倍,7~180 d强度增长率是C4-0方案的1.20倍。粉煤灰用量为5%、10%、15%时,对应G-1级配各配比方案各龄期强度增长率均高于其他级配配比方案,表明G-1级配各配比方案,强度增长潜力高。

2.2 粉煤灰与水泥比例对强度的影响

(1)粉煤灰与水泥比例对7 d强度的影响见图1所示。

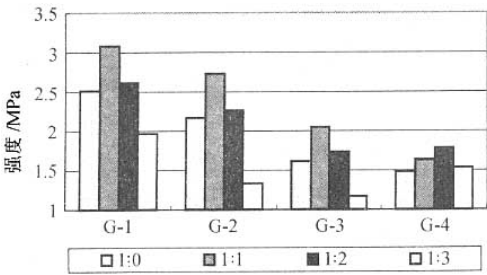


图1 不同粉煤灰掺量时各级配7 d强度

由图1可见,粉煤灰与水泥比例为1:1时,对应级配G-1~G-3配合比方案的早期(7 d)强度出现峰值;二者比例为2:1时,对应级配G-4配合比方案的早期(7 d)强度出现峰值。但随着粉煤灰与水泥比例的继续增大,当粉煤灰与水泥达到2:1、3:1时,对应级配G-1~G-3配合比方案的早期(7 d)强度均出现不同程度的降低;当二者比例为3:1时,对应级配G-1~G-3配合比方案的早期(7 d)强度有下降趋势。

出现强度下降原因在于粉煤灰掺入量过大,超

过填隙作用粉煤灰在混合料中充当细料(4.75 mm以下),细料增多,只有部分细料与水泥结合,其余过多细料只能以松散状态存在,对强度起负面效应,从而引起强度降低。

(2)粉煤灰与水泥比例对后期强度的影响(见图2~图5)

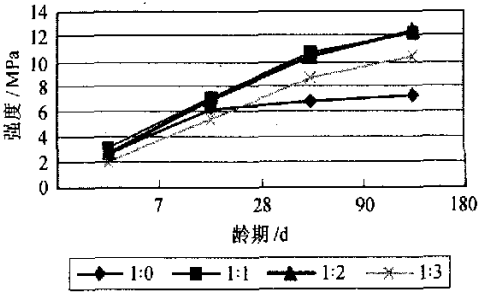


图2 对应G-1各配比不同龄期强度

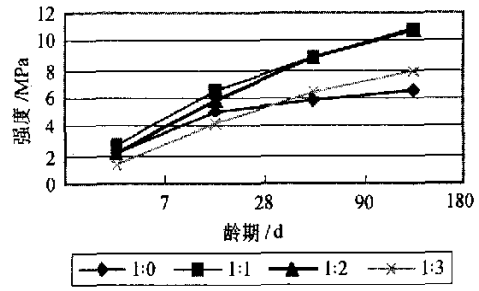


图3 对应G-2各配比不同龄期强度

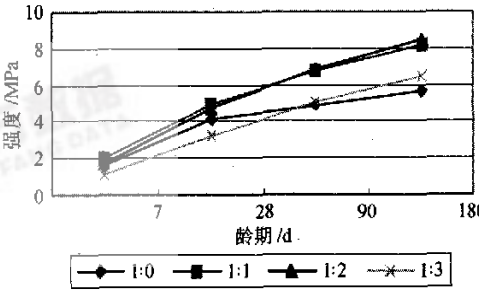


图4 对应G-3各配比不同龄期强度

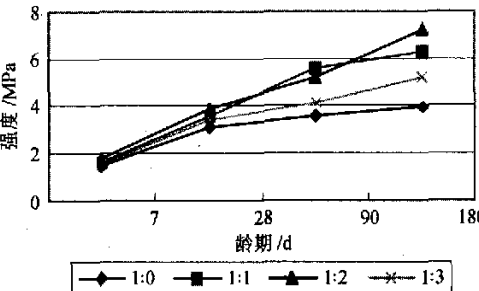


图5 对应G-4各配比不同龄期强度

由图2~图5可以看到,掺加粉煤灰后混合料强度随龄期持续增长,而未掺粉煤灰混合料虽然早期强度较高,但90 d后强度增长已趋于平稳,主要是由于粉煤灰与水泥在后期发生的“二次反应”生成的胶凝物质比单纯使用水泥生成的多,因此表现出来掺加粉煤灰后,混合料后期强度随龄期有较大幅度增长。通过后期强度对比发现,对应于G-1~G-3的各配合比方案,水泥与粉煤灰的比例为1:1和1:2时,后期强度(180 d强度)比较接近,而比例为1:3时,其后期强度比前两者都要小。对应于G-4的各配合比方案,水泥与粉煤灰比例为1:2时后期强度最高,其余依次为1:1和1:3。

2.3 劈裂抗拉强度

劈裂强度测试结果见表7所示。

表7 水泥粉煤灰砂砾180 d劈裂强度汇总

| 代号 | C1-0 | C3-0 | C4-0 | C1-1 | C3-1 | C1-2 | C3-2 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 劈裂强度/MPa | 1.04 | 0.62 | 0.82 | 1.14 | 0.71 | 1.32 | 0.88 |
| 试件个数/个 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| 变异系数 C_v /% | 11.2 | 10.3 | 7.6 | 9.6 | 9.3 | 10.2 | 10.7 |

(1)未掺粉煤灰,对应G-1级配C1-0方案劈裂强度与对应规范中值级配C4-0方案相差不大,掺入粉煤灰后对应级配G-1~G-4各方案劈裂强度G-1>G-3>G-4。表明对应G-1级配各配比方案有较高抗拉强度。

(2)粉煤灰与水泥比例不超过2:1时,随其比例的增加,劈裂强度可提高27%~42%。

3 抗裂性能研究

3.1 干燥收缩评价指标

采用干燥开裂系数^[2]评价水泥粉煤灰砂砾抗裂性能,见表8所示。

从表8可见,不同配合比方案间干缩开裂指标相差很大。

(1)干缩开裂系数依次为G-3>G-4>G-1,表明对应G-1各配合比则为最佳。

(2)水泥砂砾中掺入适量粉煤灰(粉煤灰与水泥比例为1:1~2:1),混合料干缩开裂系数增大18%~27%,其中加入5%粉煤灰后,干缩开裂值增加幅度在5%~10%。出现这种现象原因主要在于,掺入粉煤灰后混合料干缩系数有增加趋势,同时还提高混合料弯拉强度,使得总体上表现为干缩开裂系数增加。

表8 水泥粉煤灰砂砾干燥收缩开裂计算

| 指标 | C1-0 | C3-0 | C4-0 | C1-1 | C3-1 | C3-2 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C /MPa | 0.413 | 0.259 | 0.405 | 0.479 | 0.305 | 0.371 |
| E /MPa | 2 391 | 2 794 | 2 344 | 2 044 | 2 521 | 2 058 |
| $\epsilon_{\max}/10^{-6}$ | 172.7 | 92.7 | 172.8 | 234.3 | 121.0 | 180.3 |
| $\alpha_d/10^{-6}$ | 38.64 | 45.83 | 40.97 | 40.22 | 50.00 | 66.04 |
| $\beta_d/10^{-6}$ | 4.47 | 2.02 | 4.22 | 5.83 | 2.42 | 2.73 |
| Δw /% | 3.3 | 4.2 | 3.6 | 4.6 | 5.1 | 6.7 |
| n | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C_d | 0.738 | 2.076 | 0.854 | 0.789 | 2.108 | 2.454 |

注:表8中 C_d 为材料抗干缩开裂评价指标; n 为施工不均匀系数($n \geq 1$,由施工质量决定,施工质量越高, n 值越小,该指标的设置主要考虑的是在实际施工中产生的粒料离析程度、碾压是否充分、养生是否到位等因素对 S_d 的影响。可由施工单位对施工质量的自检确定。以下为讨论方便,均取为1.0); Δw 为材料的最大失水率(施工摊铺以及养护过程中,基层材料的最大失水率,以下为讨论方便,并结合室内试验结果,对于二灰碎石统一取8%); β_d 为干缩抗裂系数,%; ϵ_{\max} 为计算极限拉应变(10^{-6}); α_d 为材料的干缩系数; C 为材料的抗弯拉强度,MPa; E 为抗弯拉回弹模量,MPa。

以上分析表明,仅用干缩系数评价混合料抗裂性是不合理的,而应使用干缩开裂系数来全面评价混合料抗裂性能。

3.2 温缩评价指标

与二灰(三灰)砂砾类似,用温缩开裂系数^[2]来评价水泥(粉煤灰)砂砾温缩性能,水泥(粉煤灰)砂砾的温缩开裂计算见表9所示。

表9 水泥粉煤灰砂砾温度收缩开裂计算

| 指标 | C1-0 | C3-0 | C4-0 | C1-1 | C3-1 | C1-2 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C /MPa | 0.413 | 0.259 | 0.405 | 0.479 | 0.305 | 0.583 |
| E /MPa | 2 391 | 2 794 | 2 344 | 2 044 | 2 521 | 1 893 |
| $\epsilon_{\max}/10^{-6}$ | 172.7 | 92.7 | 172.8 | 234.3 | 121.0 | 308.0 |
| $\alpha_T/10^{-6}$ | 39 | 77 | 52 | 38 | 62 | 27 |
| $\beta_T/10^{-6}$ | 4.43 | 1.20 | 3.32 | 6.17 | 1.95 | 11.41 |
| ΔT /°C | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| C_T | 3.39 | 12.46 | 4.51 | 2.43 | 7.69 | 1.31 |

由表9可见,水泥粉煤灰砂砾不同配合比方案温缩开裂指标相差很大。

(1)温缩开裂系数G-3>G-4>G-1,骨架密实结构G-1级配各配比抗裂性最佳。

(2)水泥砂砾中掺入适量粉煤灰,混合料温缩开裂系数降低61%~74%,抗温缩开裂性能提高。出现此现象主要原因是:掺入粉煤灰降低了温缩系数,同时也减小弯拉回弹模量,提高混合料劈裂抗拉强度,从而

使混合料温缩开裂系数随粉煤灰用量增多而降低。

4 结论

通过对三类水泥粉煤灰砂砾路用性能测定,可以发现以下几点。

(1)对应骨架结构设计原则确定的G-1级配,在各配合比方案中具有高的强度增长潜力、优良的抗开裂能力、较小的冲刷量和较高的劈裂抗拉强度,为最佳集料级配方案。

(2)水泥砂砾中掺入适量($<10\%$)粉煤灰,可在不降低早期强度的前提下,由于二次火山灰作用,后期强度可提高 $49\%\sim 70\%$,劈裂强度提高 $27\%\sim 42\%$ 。

(3)适量粉煤灰的加入明显提高了混合料温缩抗裂性能,当掺入量小于 10% 时,干缩开裂系数变化不大,若加强早期养生,也可弥补抗干缩开裂性能的降低。

粉煤灰用量低于 10% 的水泥粉煤灰砂砾,当粉煤灰、水泥比例在 $1:1\sim 2:1$ 时,砂砾级配按照推荐G-1方案确定的混合料具有较高的强度增长率、劈裂强度和高的温缩抗裂性能。

参考文献:

- [1] 二灰砂砾基层综合路用性能及配比设计[R]. 长安大学, 2004.
- [2] 李炜光. 沥青路面半刚性基层抗裂性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2002.
- [3] 郑南翔. 半刚性基层材料抗裂性能研究[D]. 西安公路学院硕士学位论文, 1988.
- [4] 沙爱民. 半刚性路面材料结构与性能[M]. 人民交通出版社, 1998.
- [5] 吴赣昌. 半刚性路面温度应力分析[M]. 科学出版社, 1995.
- [6] 朱蓓蓉. I级粉煤灰火山灰反应性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2002, (1).

A Study on Pavement Performances for Cement Lime and Fly-Ash

LI Wei-guang, SHEN Ai-qin

(Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Aiming at the objection to lime and fly-ash stabilized gravel and lime stabilized gravel on pavement-performances, four gradations and nine mixture plans of cement and fly-ash gravel are studied and tested. By comparison of relativities between pavement performances and different gradations of aggregate and different contents of cement and fly-ash, it is drawn that by adding the suitable quantity of fly-ash into the mixture, the compressive and split strength, and anti-cracking properties of the mixture can be enhanced. Last, gradation and fly ash dosage are proposed.

Key words: highway engineering; pavement performance; cement and fly ash gravel

无锡公路网络日臻完善

“十五”期间,江苏省无锡市交通建设投资总额达到了155亿元,比“九五”时期增长了近两倍,日渐完善的公路交通网络,有力地支撑和保障了区域经济社会的发展需求。

“十五”期间,无锡着力构筑高速公路骨架网,现在东西向连接上海南京的有沪宁、沿江等高速公路,往南有锡宜、宁杭高速公路通往浙江,向北有锡澄高速公路跨越长江,区域内高速公路连结各个市(县)区,高速公路总里程达221 km,密度达到了每百平方公里4.6 km。截至2005年年底,该市1375 km的农村公路建设任务基本完成。农村出行条件进一步改善,农村公路的通达程度进一步提高,“1530”工程指出的“辖区内所有乡镇均能在15 min内上快速干道,30 min内到达高速公路”的目标顺利实现。宁杭高速公路被称为是一条将道路和区域文化、地区特色和谐地融合在一起,集生态、环保、景观为一体的多功能公路。“十五”期间,无锡市交通部门尽力构建人与自然、人与环境的友好和谐。辖区内干线公路绿色通道建设、文明样板路建设成效显著,其中十八湾段通过生态修复工程,道路线型和自然景观融为一体。