

文章编号:1671-1637(2015)05-0008-07

基于胶浆原理的二灰碎石设计方法

蒋应军¹, 富志鹏², 李宁方¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:为了提高二灰碎石力学强度,假设二灰碎石为一种三级空间网状结构的分散系,即微分散系二灰胶浆、细分散系二灰砂浆与粗分散系二灰碎石。基于抗压强度最优原则,采用垂直振动试验方法(VVTM)确定二灰胶浆与二灰砂浆质量比,基于密度最大原则,采用逐级填充法确定粗集料级配,基于抗压强度最优原则,确定二灰碎石中二灰砂浆用量。提出了基于胶浆原理的二灰碎石组成设计方法,并通过室内试验与现场试验对设计方法进行性能验证。验证结果表明:当石灰与粉煤灰质量比为2:5时,二灰胶浆力学性能和收缩性能最佳;当细集料质量通过率的递减系数为0.65,二灰与细集料质量比为3:2时,二灰砂浆力学强度最大;当粒径范围分别为19~37.5、9.5~19、4.75~9.5 mm的集料质量比为17:11:6时,混合粗集料密度最大;与传统方法设计的二灰碎石试件力学强度相比,基于胶浆原理设计的试件早期(7 d)力学强度提高10%以上,后期(180 d)力学强度提高20%以上;不同龄期的VVTM试件与现场芯样抗压强度之比平均为0.909,劈裂强度之比平均为0.904,而静压成型试件与现场芯样抗压强度之比为0.457,劈裂强度之比为0.531,说明VVTM比静压法设计二灰碎石更科学。

关键词:道路工程;胶浆原理;二灰碎石;设计方法;力学强度

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Design method of LSCR based on mortar theory

JIANG Ying-jun¹, FU Zhi-peng², LI Ning-fang¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: In order to improve the mechanical strength of lime-fly-ash-stabilized crushed rock (LSCR), LSCR was regarded as a dispersed system with 3-level spatial reticular structures, including lime-fly-ash mortar(LAM) micro dispersed system, lime-fly-ash fine aggregate mortar (LFAM) fine dispersed system, and LSCR coarse dispersed system. Based on the principle of optimal compressive strength, the mass ratio of LAM and LFAM was computed by using vertical vibration test method (VVTM). Based on the principle of optimal density, the gradation of coarse aggregate was confirmed by using step-by-step filling method. Based on the principle of optimal compressive strength, the optimal amount of LFAM in the LSCR was determined. The design method of LSCR was proposed based on mortar theory, and its performance was verified by using indoor experiment and field experiment. Verification result indicates that the mechanical properties and shrinkage properties of LAM are optimal when the mass ratio of lime to fly-ash is 2:5. When the decreasing coefficient of quality passing rate of fine aggregate is 0.65, the mass

收稿日期:2015-04-09

基金项目:陕西省交通科技项目(12-12K)

作者简介:蒋应军(1975-),男,浙江兰溪人,长安大学教授,工学博士,从事道路工程研究。

ratio of lime-fly-ash to fine aggregate is 3 : 2, the mechanical strength of LFAM is maximum. When the mass ratio of aggregates with particle size range of 19-37.5, 9.5-19, 4.75-9.5 mm is 17 : 11 : 6, the density of mixing coarse aggregate is maximum. Compared with the mechanical strength of LSCR specimen designed by traditional method, the early stage (7 d) mechanical strength of LSCR specimen designed by mortar theory increases by more than 10%, and the late stage (180 d) mechanical strength increases by more than 20%. The average ratio of compressive strength of VVTM specimen to specimen of site is 0.909, and the average ratio of splitting strength is 0.904. The average ratio of compressive strength of static pressure compaction specimen to specimen of site is 0.457, and the average ratio of splitting strength is 0.531. The LSCR designed by VVTM is more scientific than static pressure method. 10 tabs, 8 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; mortar theory; LSCR; design method; mechanical strength

Author resume: JIANG Ying-jun(1975-), male, professor, PhD, +86-29-62630078, jjj@chd.edu.cn.

0 引言

21 世纪开始,随着二灰碎石基层大量使用,发现其存在早期强度低、抗冲刷性能差与收缩裂缝严重等问题^[1-4],对此,中国的道路工作者们开展了大量相关研究。滕旭秋等基于重型击实方法和静压成型法通过逐级填充试验提出了骨架密实二灰稳定碎石配合比设计方法,提升了二灰碎石路用性能^[5-8];姜爱锋等将二灰碎石看成 3 个结构层次的复合材料,要求每个结构层次的配合比都能使其性能达到最佳,并将这样的配合比设计原则成功应用于远东大道道路工程的实践中^[9];滕旭秋等基于静压成型试件,以抗压强度为指标,采用正交试验研究了二灰砂浆配合比设计方法^[10];车法等基于静压成型试件,通过正交试验确定了二灰砂浆(Lime-Fly-Ash Mortar, LFAM)的最佳比例与粗集料的最佳级配,提出了骨架密实结构二灰稳定碎石材料的粗、细集料比例的计算方法,其力学性能优于悬浮密实结构二灰稳定碎石^[11];师晖军采用体积法对不同类型的二灰稳定碎石混合料进行了配合比设计,认为激活剂可提高混合料的抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量、抗冲刷性能等,但抗温缩性能略有降低^[12];陈磊等分别研究了纤维增强二灰稳定碎石基层的干缩性能与骨架密实型二灰碎石基层的收缩性能^[13-14];魏连雨等研究了非标准养生温度下二灰稳定碎石路用性能^[15]。

以上成果尤其是骨架密实结构的应用有效改善了二灰碎石路用性能,但随着重交通的发展与工程实践的深入,二灰碎石结构层在力学强度与抗裂性能等方面表现不尽如人意^[4-16]。李明杰等对比了不

同方法成型的水泥稳定碎石试件的力学强度,并与现场芯样的力学强度进行对比,结果表明静压成型试件与工程实际性能不符^[17-20];滕旭秋等采用静压成型法对二灰碎石的组成设计开展研究,结果表明基于静压成型法的矿料骨架密实级配与二灰用量的设计无法最大程度发挥骨架密实级配的作用,且也无法形成良好的粗集料骨架,不利于收缩性能,此外过多的细集料含量使得二灰碎石对含水率过于敏感,不利于施工控制^[5-11]。为此,本文在分析二灰碎石组成特点的基础上,采用垂直振动试验方法(Vertical Vibration Test Method, VVTM)^[16-19],研究了三级分散系组成与力学性能,并以各级分散系力学性能最佳为原则提出了基于胶浆原理的二灰碎石设计方法,并通过实例验证其路用性能。

1 基于胶浆原理的二灰碎石设计方法

1.1 胶浆原理

基于胶浆原理,二灰碎石混合料可以认为是一种多级空间网状结构的分散系,见图 1。二灰碎石是以粗集料为分散相,分散在二灰砂浆介质中的一种粗分散系;二灰砂浆是以细集料为分散相,分散在二灰胶浆介质中的一种细分散系;二灰胶浆

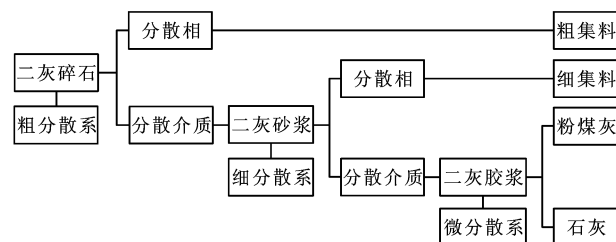


图 1 二灰碎石胶浆原理

Fig. 1 Mortar theory of LSCR

(Lime-Fly-Ash Mucilage, LAM)是以粉煤灰为分散相,分散在石灰介质中的一种微分散系。

1.2 二灰碎石设计方法

1.2.1 微分散系二灰胶浆设计

二灰胶浆的组成结构决定其路用性能。粉煤灰具有一定的活性,可与石灰发生火山灰反应提高后期强度和水稳定性,并改善抗裂性能。二灰胶浆的比例影响火山灰反应程度,若石灰与粉煤灰(简称二灰)比例不当,则有多余粉煤灰或石灰不参与火山灰反应,成为游离粉煤灰或游离石灰,而游离粉煤灰将严重影响混合料的初期甚至是后期强度,游离石灰则自行结晶生成 CaCO_3 , CaCO_3 不如火山灰反应物对二灰胶浆力学强度的影响显著,且石灰用量越大,干缩系数越大,因此,通过研究二灰比例对二灰胶浆 7 d 力学强度的影响规律,设计二灰的最佳比例。

1.2.2 细分散系二灰砂浆设计

二灰砂浆性能取决于细集料的级配和二灰胶浆与细集料的比例。

(1) 细集料级配设计

细集料级配采用 I 法设计为

$$P_d = 100I^{3.32\lg(D/d)} \quad (1)$$

式中: P_d 为粒径为 d 的集料质量通过率; I 为集料质量通过率的递减系数,一般为 0.4~0.8; D 为最大粒径,本文为 4.75 mm。

通过研究不同 I 值细集料级配对二灰砂浆 7 d 力学强度影响规律,确定细集料最佳级配。

(2) 二灰胶浆与细集料比例设计

在细集料级配已知的情况下,二灰砂浆路用性能取决于二灰胶浆与细集料的比例。细集料分散在二灰胶浆介质中,形成颗粒增强材料,当细集料所占比例较小时,细集料的增强作用不能得到充分发挥,当细集料所占比例过大时,二灰胶浆的黏结作用不能得到充分发挥,从而引起力学强度降低。只有两者处于最佳比例时,细集料的增强作用与二灰胶浆的黏结作用才能得到充分的发挥,因此,采用最佳的二灰胶浆比例和细集料级配,研究二灰胶浆与细集料比例对二灰砂浆 7 d 强度的影响规律,据此设计二灰砂浆。

1.2.3 粗分散系二灰碎石设计

二灰碎石性能取决于粗集料级配和二灰砂浆与粗集料的比例。

(1) 粗集料级配设计

为了发挥粗集料最大嵌锁作用,采用逐级填充

法确定粗集料的级配,具体方法如下。

I 级填充试验:选取 19~37.5 mm 粒径碎石为主骨料(记为 A_1), A_1 的次级粒径为 9.5~19 mm,记为 A_2 。将 A_2 以 A_1 所用质量的 5% 为步长均匀掺入到 A_1 中并振动压实,建立振实密度与 A_2 掺量的关系曲线,振实密度最大的一组作为 A_2 掺量。建议以 A_2 掺量为 55%、60%、65%、70%、75% 进行振实密度试验。

II 级填充试验: A_2 的下一级粒径为 4.75~9.5 mm,记为 A_3 ,以 I 级填充试验获取的 A_1 与 A_2 最佳质量比组成的 A_1 、 A_2 混合料为骨架结构,将 A_3 以 A_1 所用质量的 5% 为步长均匀掺入到 A_1 、 A_2 混合料中并振实,建立振实密度与 A_3 掺量关系曲线。以振实密度最大的一组作为 A_3 掺量。建议填充试验时 A_3 初始掺量为 20%。

根据上述填充试验,确定 3 种粒径粗集料之间的最优比例,该比例即为粗集料的级配。

(2) 二灰砂浆与粗集料比例设计

二灰碎石力学强度取决于粗集料的嵌锁力与二灰砂浆黏结力。若二灰砂浆不足,不仅无法密实填充粗集料骨架空隙形成强嵌锁力,且也不能充分发挥二灰砂浆的黏结强度,若二灰砂浆过多,则易形成干涉,致使粗集料骨架结构被破坏。

根据干涉理论,粗集料间隙应由二灰砂浆密实填充,且不破坏粗集料的骨架结构,因此,二灰砂浆理论最佳掺量为

$$M_1 = \frac{V\rho_1}{V\rho_1 + \rho_2} \quad (2)$$

$$V = 1 - \rho_2/\rho_3 \quad (3)$$

式中: M_1 为二灰砂浆理论最佳掺量; V 为粗集料骨架间隙率; ρ_1 为二灰砂浆最大干密度; ρ_2 为粗集料振实密度; ρ_3 为粗集料表观密度。

二灰砂浆理论最佳掺量为理想状态下理论用量。在实际工程中,石-石接触界面也裹附有二灰砂浆,另外,受施工均匀性影响,二灰砂浆实际最佳掺量必然大于理论最佳掺量,因此,以 M_1 为基础,研究不同二灰砂浆掺量对二灰碎石 7 d 力学强度影响规律,确定二灰砂浆实际最佳掺量。

1.2.4 设计内容

二灰碎石组成设计内容包括:细集料和粗集料级配、石灰与粉煤灰比例、二灰胶浆与细集料比例、二灰砂浆与粗集料比例。

基于 VVTM 方法^[16-19] 确定二灰胶浆、二灰砂浆和二灰碎石的最佳含水率和最大干密度,并制备

$\phi 15\text{ cm}\times h 15\text{ cm}$ 圆柱体试件(ϕ 、 h 分别为直径与高度),以 7 d 饱水无侧限抗压强度最大为原则确定石灰与粉煤灰最佳比例、二灰胶浆与细集料比例、二灰砂浆与粗集料比例。细集料级配采用 I 法,粗集料级配采用逐级填充法。

2 工程应用与性能验证

2.1 原材料

采用铜川黄堡一带烧制的石灰,其性质测试结果见表 1,符合技术要求^[4]。

表 1 石灰性质测试结果
Tab. 1 Test results of lime character

| 指标 | 细度/% | | CaO 与 MgO 质量分数/% |
|-----|---------------|----------------|---------------------|
| | 0.71 mm 方孔筛筛余 | 0.125 mm 方孔筛筛余 | |
| 测试值 | 0 | 2.3 | 61.0 |

采用陕西华能铜川电厂生产的粉煤灰,其颗粒组成见表 2,化学成分见表 3,符合技术要求^[4]。

表 2 粉煤灰颗粒组成
Tab. 2 Grain compositions of fly-ash

| 方孔筛孔径/mm | 4.75 | 2.36 | 0.6 | 0.075 |
|----------|-------|------|------|-------|
| 质量通过率/% | 100.0 | 97.0 | 90.0 | 80.5 |

表 3 粉煤灰化学成分
Tab. 3 Chemical compositions of fly-ash

| 指标 | 主要氧化物质量分数/% | | | 烧失量/% |
|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | |
| 测试值 | 51.6 | 19.8 | 8.0 | 12.1 |

集料采用陕西铜川孙源料场生产的石灰岩,其技术指标见表 4,符合技术要求^[4]。

表 4 集料技术指标
Tab. 4 Technical indexes of aggregates

| 集料规格/ mm | 技术指标 | | | |
|-------------|--------------------------------|-------------|-------|-------|
| | 表观密度/ (g·cm ⁻³) | 针片状 含量/% | 吸水率/% | 压碎值/% |
| 19~37.5 | 2.73 | 12.4 | 0.40 | 17.9 |
| 9.5~19 | 2.74 | 15.5 | 0.40 | 21.0 |
| 4.75~9.5 | 2.74 | 15.2 | 1.50 | |
| ≤4.75 | 2.76 | | | |

2.2 试验方法

试验方法采用《垂直振动法水泥稳定碎石设计施工技术规范》(DB 61/T 529—2011)中垂直振动试验方法,仪器工作参数见表 5^[16-20]。结合二灰碎石现场振碾特性,重新优化得到二灰碎石最佳含水率和最大干密度的振动时间为 120 s 与成型试件所需的振动时间为 80 s。

表 5 VVTM 的工作参数

Tab. 5 Working parameters of VVTM

| 工作频率/Hz | 名义振幅/mm | 工作荷载/kN | |
|---------|---------|---------|------|
| | | 上车系统 | 下车系统 |
| 30 | 1.2 | 1.8 | 1.2 |

表 6 为二灰碎石 VVTM 试件、静压成型试件与现场芯样的 7 d 力学强度。VVTM 试件与现场芯样的抗压强度之比 R_1 为 0.929,劈裂强度之比 R_2 为 0.910,静压成型试件与现场芯样的抗压强度之比 R_3 为 0.507,劈裂强度之比 R_4 为 0.545,说明 VVTM 试件与现场芯样相关性优于静压成型试件,因此,本文采用 VVTM 方法成型二灰胶浆、二灰砂浆和二灰碎石试件。

表 6 不同试件的抗压强度与劈裂强度
Tab. 6 Compressive strengths and splitting strengths of different specimens

| 抗压强度/MPa | 现场芯样 | 2.25 |
|----------|---------|------|
| | VVTM 试件 | 2.09 |
| | 静压成型试件 | 1.14 |
| 劈裂强度/MPa | 现场芯样 | 0.22 |
| | VVTM 试件 | 0.20 |
| | 静压成型试件 | 0.12 |

2.3 试验结果

2.3.1 微分散系二灰胶浆设计

不同比例二灰胶浆 7 d 抗压强度见图 2。二灰 7 d 抗压强度达到最大时,石灰与粉煤灰质量比为 2 : 5。VVTM 法确定的最佳二灰比例与静压法确定的最佳二灰比例基本相当^[6,8,10-11]。

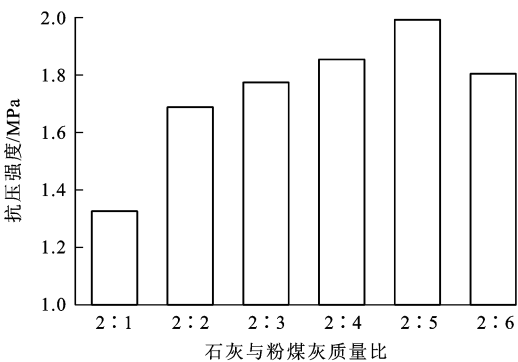


图 2 二灰胶浆抗压强度

Fig. 2 Compressive strengths of LAM

2.3.2 细分散系二灰砂浆设计

细集料级配对二灰砂浆 7 d 抗压强度的影响规律见图 3,试验时石灰与粉煤灰质量比为 2 : 5,二灰胶浆与细集料质量比分别为 3 : 1、3 : 2、3 : 3、3 : 4、3 : 5。

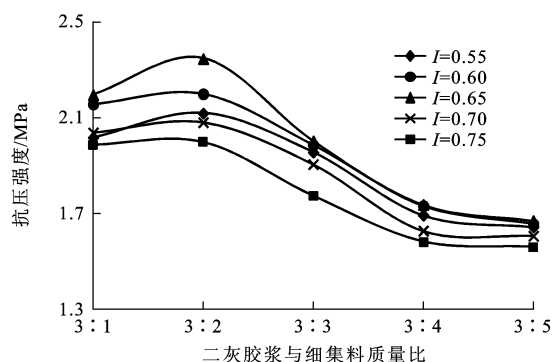


图3 二灰砂浆抗压强度

Fig. 3 Compressive strengths of LFAM

由图3可知,不同二灰胶浆与细集料质量比的二灰砂浆抗压强度峰值均出现在 I 为0.65时,且二灰胶浆与细集料质量比为3:2时,二灰砂浆抗压强度峰值最大,因此,确定细集料级配 I 为0.65,二灰胶浆与细集料质量比为3:2。试验结果与传统试验方法确定的 I 值及二灰胶浆与细集料质量比基本相同^[9,12]。振动击实法确定该比例的二灰砂浆最大干密度为 $1.655 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

2.3.3 粗分散系二灰碎石设计

(1) 粗集料级配设计

在Ⅰ级填充试验中,按照逐级填充方法,取 A_1 集料4 kg,将 A_2 集料按 A_1 集料质量的55%、60%、65%、70%、75%逐级递增填充至 A_1 集料中,分别测其振实密度,结果见图4,粗集料振实密度达到最大值时, A_2 集料的掺量为65%。

在Ⅱ级填充试验中,分别取 A_2 掺量为60%、65%,将 A_3 集料按 A_1 集料所用质量的5%逐级递增填充至 A_1 、 A_2 混合料中,分别测其振实密度,试验结果见图5,当 A_2 掺量为65%、 A_3 掺量为35%时,混合粗集料振实密度最大,为 $1.813 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,即 A_1 、 A_2 、 A_3 集料的最佳质量比为50:33:17。

(2) 二灰砂浆最佳掺量

最佳质量比粗集料的骨架间隙率为33.6%,二灰砂浆理论最佳掺量为23.4%。

不同二灰砂浆掺量对二灰碎石7 d抗压强度影响规律见图6,当二灰砂浆与粗集料质量比为32:68时,二灰碎石抗压强度最大,因此,确定二灰砂浆实际最佳掺量为32%。

(3) 二灰碎石最佳配比

综上所述得到二灰碎石最佳配比如下:石灰与粉煤灰质量比为2:5,二灰胶浆与细集料质量比为3:2,二灰砂浆与粗集料质量比为8:17,其中细集料级配 I 为0.65,粗集料级配 A_1 、 A_2 、 A_3 的质量比

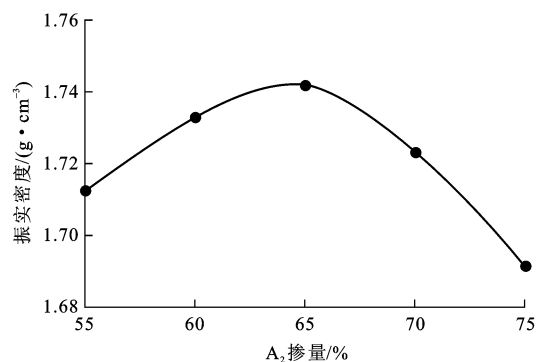


图4 Ⅰ级填充试验结果

Fig. 4 Result of grade I filling experiment

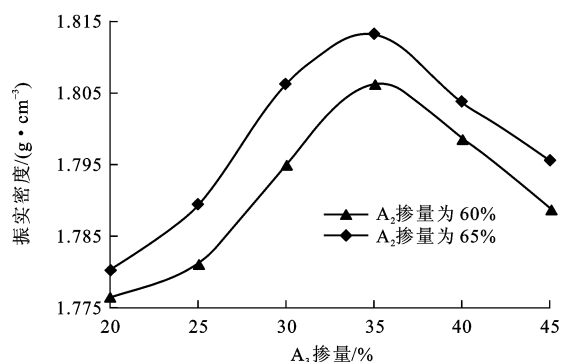


图5 Ⅱ级填充试验结果

Fig. 5 Result of grade II filling experiment

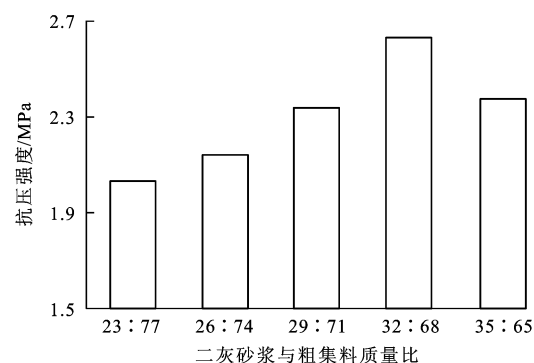


图6 不同二灰砂浆与粗集料质量比的抗压强度

Fig. 6 Compressive strengths for different mass ratios of LFAM to coarse aggregate

为50:33:17,其中二灰用量 M_2 表示为

$$M_2 = 3M_1/5 = 19.2\% \approx 19\%$$

细集料用量 M_3 表示为

$$M_3 = 2M_1/5 = 12.8\% \approx 13\%$$

根据表7二灰碎石各材料组成比计算最佳配比对应矿料级配见表8。表8中还列出《公路路面基层施工技术规范》(JTJ 034—2000)^[4]级配。

由表8可以看出,本文建议级配粗集料明显比规范级配粗集料用量要多,更有利于形成骨架结构。

表 7 二灰碎石材料组成

Tab. 7 Composition of LSCR with different materials

| 二灰组成 比例/% | 不同粒径(mm)集料组成比例/% | | | |
|--------------|------------------|--------|----------|-------|
| | 19~37.5 | 9.5~19 | 4.75~9.5 | ≤4.75 |
| 19 | 34 | 22 | 12 | 13 |

表 8 建议级配与规范级配

Tab. 8 Suggested gradation and standard gradation

| 级配 | 通过不同筛孔(mm)的质量百分率/% | | | | | | | |
|------|--------------------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| | 37.5 | 31.5 | 19 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 0.6 | 0.075 |
| 建议级配 | 100.0 | 95.7 | 52.8 | 28.4 | 11.5 | 6.1 | 2.7 | 0.8 |
| 规范级配 | 100.0 | 100.0 | 89.5 | 61.0 | 40.0 | 28.0 | 13.0 | 3.5 |

2.4 性能验证

2.4.1 室内试验结果

不同龄期二灰碎石试件抗压强度和劈裂强度随龄期变化规律分别见图 7、8,级配对强度影响结果见表 9, R_a 为建议级配和规范级配中值的抗压强度之比, R_b 为建议级配和规范级配中值的劈裂强度之比。试验采用表 8 中 2 种级配的二灰碎石 VVTM 成型试件,石灰与粉煤灰质量比为 2 : 5,二灰与集料质量比为 19 : 81。

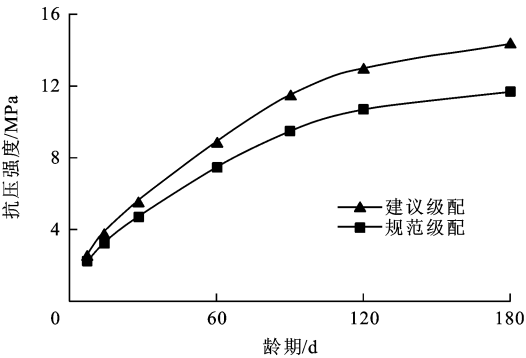


图 7 不同龄期二灰碎石试件抗压强度
Fig. 7 Compressive strengths of LSCR specimens
with different ages

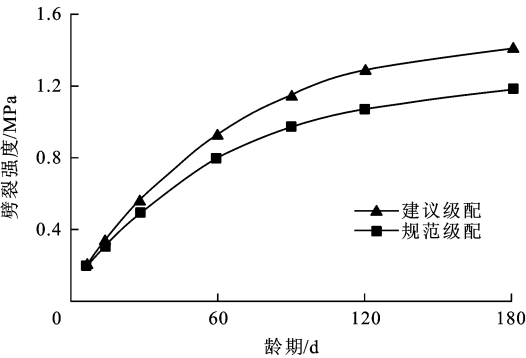


图 8 不同龄期二灰碎石试件劈裂强度
Fig. 8 Splitting strengths of LSCR specimens with different ages

表 9 二灰碎石试件不同龄期力学强度之比

Tab. 9 Mechanical strength ratios of LSCR specimens with different ages

| 龄期/d | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 | 120 | 180 |
|-------|------|------|------|-------|------|------|------|
| R_a | 1.16 | 1.17 | 1.19 | 1.19 | 1.20 | 1.22 | 1.23 |
| R_b | 1.10 | 1.13 | 1.14 | 11.60 | 1.19 | 1.20 | 1.20 |

由图 7、8 可以看出,不同龄期的建议级配二灰碎石混合料力学强度均优于规范级配二灰碎石混合料,且随着龄期的增加,差距逐渐增大。由表 9 可知,与规范级配二灰碎石相比,建议级配二灰碎石早期(7 d)抗压强度与劈裂强度分别提高了 16%、10%,后期(180 d)抗压强度与劈裂强度分别提高了 23%、20%,这主要是因为粗集料相互嵌挤以及二灰砂浆密实填充使得混合料形成较大的内摩擦角,且二灰混合料具有较大内聚力,因此,二灰碎石表现出较高的力学强度。

2.4.2 现场应用效果

为了验证室内试验结果,在陕西省铜川市耀旬二级公路铺筑了试验路,试验路采用本文确定的骨架密实二灰碎石级配,并用现场摊铺的混合料在室内分别采用 VVTM 法和静压法按 98% 压实度成型试件,试件当天运到施工现场并覆盖土工布,与现场基层同步养生。现场芯样、VVTM 试件与静压成型试件的力学强度见表 10。由表 10 可以看出:不同龄期的 VVTM 试件与现场芯样抗压强度之比平均为 0.909,劈裂强度值之比平均为 0.904;静压成型试件与现场芯样抗压强度之比为 0.457,劈裂强度之比为 0.531。证明采用 VVTM 法研究二灰碎石组成结构与性能之间规律更可靠,更适合用于材料组成设计。另外,若不计入试验条件的影响,则本文方法成型试件与现场芯样力学性能基本一致,能准确反映现场的路用性能,且优于规范设计标准,对确保工程质量具有重要意义。

3 结 语

- (1)石灰与粉煤灰质量比为 2 : 5 时,二灰胶浆 7 d 抗压强度最大。
- (2)细集料级配 I 为 0.65,二灰胶浆与细集料质量比为 3 : 2 时,二灰砂浆抗压强度最大。
- (3)3 种集料 A_1 、 A_2 、 A_3 与石屑的质量比为 34 : 22 : 12 : 13 时,混合料振实密度最大;石灰与粉煤灰质量比为 2 : 5,二灰与集料质量比为 19 : 81 时,二灰碎石抗压强度最大。
- (4)与传统方法相比,基于胶浆原理设计二灰碎

表 10 二灰碎石力学强度

Tab. 10 Mechanical strengths of LSCR

| 龄期/d | | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 |
|----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 抗压强度/MPa | 现场芯样 | 2.30 | 3.30 | 5.60 | 8.60 | 10.60 |
| | VVTM 试件 | 2.10 | 3.10 | 5.00 | 7.80 | 9.50 |
| | 静压成型试件 | 1.10 | 1.70 | 2.50 | 3.70 | 4.40 |
| 劈裂强度/MPa | 现场芯样 | 0.23 | 0.33 | 0.55 | 0.90 | 1.09 |
| | VVTM 试件 | 0.21 | 0.30 | 0.49 | 0.80 | 1.00 |
| | 静压成型试件 | 0.12 | 0.17 | 0.27 | 0.45 | 0.56 |
| R_1 | | 0.913 | 0.939 | 0.893 | 0.907 | 0.896 |
| R_2 | | 0.913 | 0.909 | 0.891 | 0.889 | 0.917 |
| R_3 | | 0.478 | 0.515 | 0.446 | 0.430 | 0.415 |
| R_4 | | 0.565 | 0.545 | 0.509 | 0.511 | 0.523 |

石后期力学强度提高了 20% 以上; 振动成型试件与现场芯样力学强度比超过 0.90, 而静压成型试件与现场芯样力学强度比不足 0.55, 说明采用振动法研究二灰碎石组成结构与性能之间规律更可靠, 更适合用于材料组成设计。本文成果有待于更多材料类型、更多实体工程实践验证。

参 考 文 献 :

References :

- [1] BARENBERG E J, THOMPSON M R. Design, construction, and performance of lime, fly ash, and slag pavement[C]//TRB. 61st Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 1982: 1-6.
- [2] SHARPE G W, DEEN R C, SOUTHGATE H F, et al. Pavement thickness designs using low-strength (Pozzolan) base and subbase materials[J]. Transportation Research Record, 1985(1043): 122-130.
- [3] 李振霞, 陈渊召. 不同类型半刚性基层材料性能的试验与分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(1): 41-46.
LI Zhen-xia, CHEN Yuan-zhao. Test and analysis of properties for different types of semi-rigid base materials[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(1): 41-46. (in Chinese)
- [4] JTJ034—2000, 公路路面基层施工技术规范[S].
JTJ034—2000, technical specifications for construction of highway roadbases[S]. (in Chinese)
- [5] 滕旭秋. 二灰碎石混合料配合比设计及路用性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2003.
TENG Xu-qiu. Mixture design and pavement performance of lime-fly ash stabilized aggregates[D]. Xi'an: Chang'an University, 2003. (in Chinese)
- [6] 刘红瑛, 戴经梁. 骨架密实二灰稳定碎石混合料配合比设计方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(2): 11-16.
LIU Hong-ying, DAI Jing-liang. Design method of mixture skeleton densified with lime-flyash and crushed rock[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(2): 11-16. (in Chinese)
- [7] 刘红瑛, 牛长友, 王 强, 等. 骨架密实型二灰稳定碎石基层路用性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(3): 37-42.
LIU Hong-ying, NIU Chang-you, WANG Qiang, et al. Pavement performance of lime flyash stabilized aggregate base with skeleton dense structure[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(3): 37-42. (in Chinese)
- [8] 蒋应军. 多级嵌挤骨架密实二灰碎石组成设计方法研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(5): 732-736.
JIANG Ying-jun. Mix design method for lime-fly-ash-stabilized aggregate of multilevel dense built-in grading structure[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2010, 29(5): 732-736. (in Chinese)
- [9] 姜爱锋, 任惠清. 二灰碎石组成配合比设计[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1999, 27(3): 309-313.
JIANG Ai-feng, REN Hui-qing. Mixture design of lime-flyash stabilized aggregate[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1999, 27(3): 309-313. (in Chinese)
- [10] 滕旭秋, 陈忠达. 二灰砂浆配合比设计方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(3): 37-40.
TENG Xu-qiu, CHEN Zhong-da. Mixture design method for lime-fly ash mortar[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3): 37-40. (in Chinese)
- [11] 车 法, 陈拴发, 朱金凤, 等. 骨架密实型二灰稳定碎石配合比设计方法研究[J]. 河北工业大学学报, 2010, 39(2): 96-99.
CHE Fa, CHEN Shuan-fa, ZHU Jin-feng, et al. Research on mixture component design of "skeleton-closed" lime-fly ash stabilized aggregate[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2010, 39(2): 96-99. (in Chinese)
- [12] 师晖军. 高性能二灰稳定碎石混合料设计和路用性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(8): 69-72.
SHI Hui-jun. Research on mixture design and pavement performance of high performance lime fly-ash stabilized aggregate[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2014, 31(8): 69-72. (in Chinese)
- [13] 陈 磊, 滕桃居, 石 祥. 纤维增强二灰稳定碎石基层干缩性能的试验研究[J]. 交通标准化, 2013(24): 63-65.
CHEN Lei, TENG Tao-ju, SHI Xiang. Experimental study on fiber reinforcing dry shrinkage performance of two ash stabilization macadam base[J]. Transportation Standardization, 2013(24): 63-65. (in Chinese)
- [14] 马士宾, 刘俊琴, 郭建宁, 等. 骨架密实型二灰碎石基层的收缩性能[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2013, 32(2): 215-219.
MA Shi-bin, LIU Jun-qin, GUO Jian-ning, et al. Research on shrinkage performance of dense skeleton based on lime fly-ash stabilized aggregate[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2013, 32(2): 215-219. (in Chinese)
- [15] 魏连雨, 王 涛, 马士宾. 非标准养生温度下二灰稳定碎石路

(下转第 33 页)

- 控制分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 51-56.
- WANG Da, LI Yu-peng, LIU Yang. Analysis of refinement control of anchor cable tension for long-span suspension bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 51-56. (in Chinese)
- [7] 陈常松, 陈政清, 颜东煌. 柔索索力主频阶次误差及支承条件误差[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 17-20.
- CHEN Chang-song, CHEN Zheng-qing, YAN Dong-huang. Frequency number error and support condition of flexible cable tension [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(4): 17-20. (in Chinese)
- [8] 唐盛华, 方 志, 杨 索. 考虑边界条件的频率法测索力实用公式[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(8): 7-13.
- TANG Sheng-hua, FANG Zhi, YANG Suo. Practical formula for the estimation of cable tension in frequency method considering the effects of boundary conditions[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(8): 7-13. (in Chinese)
- [9] KIM B H, PARK T. Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304(3-5): 660-676.
- [10] ZUI H, SHINKE T, NAMITA Y. Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(6): 651-656.
- [11] FANG Zhi, WANG Jian-qun. Practical formula for cable tension estimation by vibration method[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(1): 161-164.
- [12] NAM H, NGHIA N T. Estimation of cable tension using measured natural frequencies [J]. Procedia Engineering, 2011, 14(11): 1510-1517.
- [13] PELGRIMS P, DE COOMAN M, PUERS R. Sensor and instrumentation for cable tension quantification[J]. Procedia Engineering, 2014, 87: 1473-1476.
- [14] GAO Jun-qi, SHI Bin, ZHANG Wei, et al. Monitoring the stress of the post-tensioning cable using fiber optic distributed strain sensor[J]. Measurement, 2006, 39(5): 420-428.
- [15] CHO S, YIM J, SHIN S W. Comparative field study of cable tension measurement for a cable-stayed bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(8): 748-757.
- [16] 余加勇, 邵旭东, 孟晓林, 等. 基于自动型全站仪的桥梁结构动态监测试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(10): 55-63, 92.
- YU Jia-yong, SHAO Xu-dong, MENG Xiao-lin, et al. Experiment of dynamic monitoring of bridge structures using robotic total station [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(10): 55-63, 92. (in Chinese)
- [17] KIM S W, KIM N S. Dynamic characteristics of suspension bridge hanger cables using digital image processing [J]. NDT&E International, 2013, 59(7): 25-33.
- [18] ZHENG G, KO J M, NI Y Q. Multimode-based evaluation of cable tension force in cable-supported bridges[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4330: 511-522.
- [19] KANGAS S, HELMICKI A, HUNT V, et al. Cable-stayed bridges: case study for ambient vibration-based cable tension estimation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(6): 839-846.
- [20] 郭 福, 乔卫华. 悬索桥基准索股架设若干影响因素分析与控制[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(3): 71-73.
- GUO Fu, QIAO Wei-hua. Analysis and control of factors affecting erection of datum strand of suspension bridge[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2014, 31(3): 71-73. (in Chinese)
- [21] 王建飞. 拱桥吊杆索力的振动法测量[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- WANG Jian-fei. Vibration method measurement for cable tension of arch bridge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 14 页)
- 用性能试验研究[J]. 公路, 2012(1): 34-38.
- WEI Lian-yu, WANG Tao, MA Shi-bin. Test and study on road performance of lime-flyash stabilized aggregates under non-standard curing temperature [J]. Highway, 2012(1): 34-38. (in Chinese)
- [16] DB 61/T 529—2011, 垂直振动法水泥稳定碎石设计施工技术规范[S].
- DB 61/T 529—2011, specifications for design and construction of cement stabilized macadam base VVTM[S]. (in Chinese)
- [17] 李明杰, 蒋应军, 张俊杰, 等. 半刚性基层材料振动试验方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1): 7-12.
- LI Ming-jie, JIANG Ying-jun, ZHANG Jun-jie, et al. Vibration test method of semi-rigid base course material [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 7-12. (in Chinese)
- [18] JIANG Y J, FAN L F. An investigation of mechanical behavior of cement-stabilized crushed rock material using different compaction methods[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48(11): 508-515.
- [19] JIANG Ying-jun, WONG L N Y, REN Jiao-long. A numerical test method of California bearing ratio on graded crushed rocks using particle flow modeling[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(2): 107-115.
- [20] 田 波, 权 磊, 牛开民. 不同基层类型水泥混凝土路面温度翘曲结构试验与理论分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(6): 17-26.
- TIAN Bo, QUAN Lei, NIU Kai-min. Structural experiment and theoretical analysis of thermal curling in JPCP with different base types [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(6): 17-26. (in Chinese)